

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THÈSE

Présentée au Département de Génie Civil

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Civil

Option : Géo matériaux

Par

LAOUIDJI Zakarya

THÈME

**Contribution à la valorisation des déchets dans les
matériaux de construction**

Soutenue le 16 /05 /2026 devant le Jury :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Établissement
HADJI Rihab	Professeur	Président	Université de Sétif 1
BOUTLIKHT Mourad	MCA	Rapporteur	Université de Sétif 1
HEBBACHE KAMEL	MCA	Co-Rapporteur	Université de Sétif 1
KHITAS Nourelhouda	MCA	Examinatrice	Université de Sétif 1
SAADI Mohamed	MCA	Examineur	Université de Batna 2
KHOUDJIA Mohamed Lyes	MCA	Examineur	Université de Constantine 1
DOUADI Abdellah	MCA	Invité	Université de Sétif 1



Remerciements

De prime abord, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant et Le remercie pour les bienfaits dont Il m'a comblé, notamment la santé, la force et la patience qui m'ont permis de surmonter les difficultés rencontrées au cours de ce travail scientifique.

A cet égard, je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, Monsieur le Dr Mourad Boutlikh, ainsi qu'au Dr Kamel Hebbache, pour leurs orientations précieuses, leurs remarques constructives et leur accompagnement scientifique constant, qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Je témoigne également de ma reconnaissance au Dr Abdellah Douadi et au Professeur Chérif Belébchouche, de l'Université de Sétif, pour leurs conseils avisés, leurs observations pertinentes et leurs encouragements sincères, qui ont enrichi ce travail.

De même, mes remerciements vont aussi à mon ami Elhoussine Atiki, de l'Université de Biskra, pour son soutien constant et son appui fraternel, ainsi qu'à Madame la Docteure Safa Layachi pour son aide scientifique et ses remarques précieuses.

En outre, j'exprime ma vive gratitude à l'équipe du Laboratoire des Travaux Publics de Sétif pour son appui technique et scientifique, sa disponibilité et sa précieuse collaboration durant les essais expérimentaux,

Parallèlement, mes chaleureux remerciements vont également à l'ensemble du personnel scientifique et technique du Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) de Souidania – Alger, pour sa coopération fructueuse et la mise à disposition des moyens nécessaires à la réalisation des expérimentations.

A terme ultime, une reconnaissance particulière revient à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse et qui m'ont soutenu par une parole bienveillante, un conseil ou une prière sincère.

Que Dieu les récompense pour leur bonté et leur générosité.

Merci



DEDICACE

*À mon père bien-aimé, qui nous a quittés, où que tu sois.
Certes, tu as quitté ce monde, mais ta mémoire demeurera à
jamais vivante dans mon cœur.*

*À ma chère mère, source infinie de tendresse et de
générosité, aucun mot ne saurait suffire à exprimer ma
gratitude pour l'amour et le soutien constants que tu m'as
prodigués tout au long de ma vie. Sache combien je te suis
profondément reconnaissant ; ton appui et tes
encouragements ont toujours été pour moi un pilier
indispensable.*

*À ma précieuse famille, votre soutien inébranlable et
votre confiance en moi ont renforcé ma détermination à
mener à bien cette thèse. Recevez toute mon affection et ma
reconnaissance.*

Zakarya Laouidji



الملخص

تُعد النفايات الطبية من التحديات البيئية المتنامية على المستويين العالمي والوطني، إذ تواجه الجزائر صعوبات في معالجتها بسبب اعتماد طرق تقليدية مثل الحرق والمعالجة المسبقة، وهي مكلفة وتخلّف آثارًا بيئية سلبية في المقابل، يشهد قطاع البناء تحولات كبيرة نحو حلول أكثر استدامة من خلال اعتماد مواد محلية ومنخفضة الانبعاثات، بهدف تقليص الاعتماد على الإسمنت الذي يُعد من أكثر المواد المسببة لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

ويبرز الطوب الطيني كخيار بناء بديل وواعد، نظراً لتوقّره محلياً، كلفته المنخفضة، قابليته للتثبيت بوسائل بسيطة، فضلاً عن خصائصه الحرارية الجيدة التي تسهم في رفع كفاءة الطاقة للمباني. تهدف هذه الدراسة إلى تثمين نفايات الكمادات الطبية من خلال دمجها في الطوب الطيني المثبت بالجير والإسمنت لتحسين خصائصه الميكانيكية والحرارية، وبالتالي إنتاج مادة بناء مستدامة ذات أداء محسن. تم تقسيم العمل التجريبي إلى مرحلتين رئيسيتين:

في المرحلة الأولى، تمت دراسة تأثير إضافة الجير والإسمنت بنسب 2% إلى 10% على ثلاث أنواع من التربة المحلية. أظهرت النتائج أن الجير بنسبة 8% حسّن مقاومة الضغط بنسبة 101% للتربة B، بينما حقق الإسمنت بنسبة 10% أفضل أداء ميكانيكي عام مع خفض امتصاص الماء.

أما المرحلة الثانية، فقد تضمنت إدماج نفايات الكمادات بأبعاد (1×0.5 سم² و 2×1 سم²) وبنسب مضافة من 0% إلى 40%. وأظهرت النتائج تحسن العزل الحراري بنسبة 53.39% عند 40% وبُعد 2×1 سم²، كما ارتفعت مقاومة الضغط والانحناء بنسبة 10.59% و 13.49% عند نسب منخفضة (5% و 10%) للأبعاد 1×0.5 سم².

تؤكد هذه النتائج أن الجمع بين الطوب الطيني كمادة بديلة للإسمنت، وتقنيات التثبيت التقليدية (الجير والإسمنت)، وتثمين نفايات الكمادات الطبية يشكل خيارًا تقنيًا وبيئيًا واعدًا لإنتاج مواد بناء مستدامة، ذات خصائص ميكانيكية وحرارية محسّنة

الكلمات المفتاحية: النفايات الطبية، مواد البناء، الخصائص الميكانيكية، الموثوقية، البيئة، إعادة التدوير.

Résumé

Les déchets médicaux représentent un défi environnemental croissant aux niveaux mondial et national. En Algérie, leur traitement demeure problématique en raison de la dépendance à des méthodes traditionnelles telles que l'incinération et la désinfection préalable, qui sont coûteuses et génèrent des impacts environnementaux négatifs.

En parallèle, le secteur de la construction connaît une évolution importante vers des solutions plus durables grâce à l'utilisation de matériaux locaux et à faibles émissions, dans le but de réduire la dépendance au ciment, l'un des principaux émetteurs de dioxyde de carbone. La brique en terre crue s'impose comme une alternative de construction prometteuse, en raison de sa disponibilité locale, de son faible coût, de sa facilité de stabilisation ainsi que de ses bonnes propriétés thermiques contribuant à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Cette étude a pour objectif de valoriser les déchets de masques médicaux en les incorporant dans des briques en terre crue stabilisées à la chaux et au ciment afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques et thermiques, et de développer ainsi un matériau de construction durable aux performances optimisées.

Le programme expérimental a été divisé en deux étapes principales : Dans la première étape, l'effet de l'ajout de chaux et de ciment à des taux variant de 2 % à 10 % a été étudié sur trois types de sols locaux. Les résultats ont montré qu'un ajout de 8 % de chaux a permis d'augmenter la résistance à la compression de 101 % pour le sol B, tandis qu'un ajout de 10 % de ciment a conduit à la meilleure performance mécanique globale, avec une réduction significative de l'absorption d'eau.

La deuxième étape a consisté à incorporer des déchets de masques médicaux de dimensions ($0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ et $1 \times 2 \text{ cm}^2$) à des taux allant de 0 % à 40 %. Les résultats ont révélé une amélioration de l'isolation thermique de 53,39 % pour un taux de 40 % et une dimension de $1 \times 2 \text{ cm}^2$. Par ailleurs, la résistance à la compression et à la flexion a augmenté respectivement de 10,59 % et 13,49 % pour de faibles taux d'incorporation (5 % et 10 %) avec les dimensions de $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$.

Ces résultats confirment que l'association de la brique en terre crue, des techniques de stabilisation traditionnelles et de la valorisation des déchets de masques médicaux constitue une option prometteuse pour produire des matériaux de construction durables, aux performances mécaniques et thermiques améliorées, tout en réduisant l'impact environnemental.

Mots clés : déchets hospitaliers, matériaux de construction , caractéristiques mécaniques, fiabilité, Environnement, recyclage.

Abstract

Medical waste represents a growing environmental challenge at both the global and national levels. In Algeria, its management remains problematic due to reliance on traditional methods such as incineration and preliminary disinfection, which are costly and generate negative environmental impacts.

At the same time, the construction sector is undergoing a significant shift toward more sustainable solutions through the use of local, low-emission materials, aiming to reduce dependence on cement, one of the main sources of carbon dioxide emissions. Adobe bricks (raw earth bricks) emerge as a promising construction alternative due to their local availability, low cost, ease of stabilization, and good thermal properties that contribute to improving the energy efficiency of buildings. This study aims to valorize medical mask waste by incorporating it into lime- and cement-stabilized adobe bricks to enhance their mechanical and thermal properties, thereby developing a sustainable construction material with optimized performance.

The experimental program was divided into two main stages: In the first stage, the effect of adding lime and cement at rates ranging from 2% to 10% was studied on three types of local soils. The results showed that adding 8% lime increased the compressive strength by 101% for soil B, while adding 10% cement achieved the best overall mechanical performance, along with a significant reduction in water absorption.

The second stage involved incorporating medical mask waste with dimensions of $0.5 \times 1 \text{ cm}^2$ and $1 \times 2 \text{ cm}^2$ at rates ranging from 0% to 40%. The results revealed an improvement in thermal insulation of 53.39% at a 40% incorporation rate and $1 \times 2 \text{ cm}^2$ size. Additionally, compressive and flexural strength increased by 10.59% and 13.49%, respectively, for low incorporation rates (5% and 10%) with the smaller $0.5 \times 1 \text{ cm}^2$ size.

These results confirm that combining adobe bricks, traditional stabilization techniques, and the valorization of medical mask waste constitutes a promising option for producing sustainable construction materials with improved mechanical and thermal performance while reducing environmental impact.

Keywords: hospital waste, construction materials, mechanical properties, reliability, environment, recycling

Table des matières

Remerciements	I
DEDICACES	II
ملخص	III
RESUME	IV
ABSTRACT	V
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES TABLEAU	XIII
LISTE DES SYMBOLES	XIV

INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction	1
2. Motivations du choix des déchets de masques faciaux médicaux	1
3. Motivations du choix des briques de terre	2
4. Objectif principal de la recherche	3

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BRIQUES DE TERRE

I.1 Introduction	5
I.2 Construction en terre entre passé et présent	5
I.3 Techniques de construction avec des matériaux en terre	7
I.4 Rappel sur l'argile	9
I.4.1 Familles de l'argile	10
I.4.2 Techniques de stabilisation des matériaux en terre	13
I.4.2.1 Stabilisation mécanique	13
I.4.2.2 Stabilisation physique	14
I.4.2.3 Stabilisateurs chimiques	15
I.4.2.3.1 Ciment	15
I.4.2.3.2 Chaux	16
I.4.3 L'utilisation de fibres naturelles et synthétiques dans la stabilisation des briques	18
I.4.4 Effet des déchets industriels sur les propriétés des briques imbrûlées	19
I.4.4.1 Effet des déchets industriels sur les propriétés thermiques des briques de terre	20
I.4.4.2 Effet des résidus industriels sur les propriétés mécaniques des briques en terre	21
I.5 Conclusion	24

CHAPITRE II

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DECHETS MEDICAUX

II.1 Introduction:	26
II.2 Définition des déchets	27
II.3 Classification des déchets	28
II.3.1 Déchets ménagers	28
II.3.2 Déchets inertes	28
II.3.3 Déchets solides urbains	29
II.3.4 Les déchets hospitaliers	29
II.3.4.1 Classification des déchets des soins de santé	33
II.3.4.1.1 Déchets de soins de santé dangereux	33
II.3.4.1.2 Déchets sanitaires non dangereux	33
II.3.4.2 Techniques d'exploitation des déchets médicaux	34
II.3.4.3 Déchets d'équipements de protection individuelle- Masque chirurgical-	34
II.3.4.3.1 Types de masques	35
II.3.4.3.2 Les effets négatifs des masques sur l'environnement	36
II.3.4.3.3 Défis actuels en matière de gestion des déchets des masques	37
II.3.4.3.4 Valorisation des déchets de masques dans le domaine de la construction	38
II.3.4.3.5 Utilisation de déchets de masques médicaux dans le béton	39
II.4 Conclusion	45

CHAPITRE III :

TRAITEMENT ET SELECTION DES SOLS

III.1 Introduction	47
III.2 Programme expérimental	47
III.2.1 Matériaux utilisés	47
III.2.1.1 Les sols utilisés	47
III.2.1.2 La chaux	50
III.2.1.3 Ciment	51
III.2.1.4 Eau	51
III.2.2 Préparation des échantillons	52
III.2.3 Essais effectués	54
III.2.3.1 Essai de résistance à la compression	54
III.2.3.2 Essai de résistance à la flexion	54
III.2.3.3 Absorption totale	55

III.2.3.4 Absorption d'eau capillaire	55
III.3 Résultats et discussions	56
III.3.1 Essai de résistance à la compression	56
III.3.1.1 Mélanges contenant de la chaux	56
III.3.1.2 Mélanges stabilisés avec du ciment	58
III.3.2 Essai de résistance à la flexion	60
III.3.2.1 Mélanges stabilisés avec de la chaux	60
III.3.2.2 Mélanges stabilisés avec du ciment	61
III.3.3 Absorption totale	62
III.3.3.1 Echantillons contenant de la chaux	62
III.3.3.2 Absorption totale des éprouvettes contenant du ciment	64
III.4 Conclusion	66

CHAPITRE IV

EFFET DES DECHETS SUR LE COMPORTEMENT DES BLOCS DE TERRE

IV.1 Introduction	67
IV.2 Matériaux utilisés	67
IV.2.1 Le sol et la chaux comme constituants de base	67
IV.2.2 Masques chirurgicaux	67
IV.2.2.1 Masse volumique apparente des pièces de masque facial	69
IV.2.2.2 Absorption des Pièces de masque facial	69
IV.2.3 Mélanges et confection des éprouvettes	70
IV.3 Tests effectués	71
IV.3.1 Caractéristiques physiques	71
IV.3.1.1 Densité apparente	71
IV.3.1.2 Essai à l'ultra-son	71
IV.3.1.3 Absorption totale	72
IV.3.2 Caractéristiques mécaniques	72
IV.3.3 Propriétés thermiques	73
IV. 4 Résultats et discussions	74
IV.4.1 Effet des déchets de masques sur les Caractéristiques physiques	74
IV.4.1.1 La Densité	74
IV.4.1.2. La vitesse de propagation des ondes à l'ultra-son	75
IV.4.1.3 Absorption totale d'eau	77
IV.4.2 Effet des déchets de masques sur les propriétés mécaniques	78
IV.4.2.1. Résistance à la compression	78

IV.4.2.2 Résistance à la flexion	82
IV.4.3. Effet des déchets de masques sur les Propriétés thermiques	86
IV.4.3.1 Conductivité thermique (CT)	86
IV.4.3.2. Capacité thermique spécifique	88
IV.4.3.3 Effusivité thermique	89
IV.5 Conclusion	91
CONCLUSION GENERALE	
Conclusion	93
Recommandations et perspectives	95
Références bibliographiques	96

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :déchets médicaux	2
Figure 2: Exemples de constructions en terre à travers le monde a) Yémen, b) Chine c) Mexique d) Mosquée du Mali	3
Figure I.1 : Carte des régions de construction traditionnelle dans le monde, avec les sites du patrimoine mondial de l'UNESCO [10]	6
Figure I.2: construction en pisé (Sources Internet)	7
Figure I.3: Fabrication de Terre-paille (Sources Internet)	8
Figure I.4: Fabriquer des constructions en torchis (Sources Internet)	8
Figure I.5: Fabriquer des constructions en Blocs de terre compactée (Sources Internet)	9
Figure I.6: Structure de la kaolinite, version modifiée d'après Grim (1962) [27].	11
Figure I.7 : Structure de l'illite (USGS) [28].	12
Figure I.8 : Structure du minéral smectite, la montmorillonite[30].	13
Figure I.9: Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en chaux sur la résistance mécanique [34].	14
Figure I.10 : Relation entre la teneur en sable et la résistance à la compression du sol dans des conditions sèches et humides [35]	15
Figure I.11 : Réaction pouzzolanique[44].	17
Figure I.12 : Classification des fibres naturelles [49]	18
Figure I.13 : Résistance moyenne à la compression du BTC en fonction de la teneur en fibres des blocs[56]	22
Figure I.14 :Compressive strength development [62]	22
Figure I.15 : Résistance à la compression des échantillons de briques avec : a) des additifs PEHD (b) des additifs PET [58]	23
Figure II.1 : Les déchets[inertes]	28
Figure II.2 : Équipement de protection individuelle : Masque facial, masque N95, écran facial, lunettes de protection, gants en latex, gants en nitrile, gants longs en nitrile, blouse de médecin, blouse médicale.	30
Figure II.3 : Masques chirurgicaux [101].	35
Figure II.4: Menaces pour la vie aquatique dues à l'utilisation de masques faciaux [105]	37
Figure II.5 :Résistance à la compression et traction 28 jours [111] .	40
Figure II.6: Résultats des tests d'absorption d'eau [111] .	40
Figure II.7 :(a) Résistance à la compression et(b) et a la traction [2] .	41
Figure II.8 :Résistance à la compression [120]	42
Figure II.9 : Résistance à la traction [120] .	42

Figure II.10 :(a)Résistance à la compression (b) Résistance à la traction à 28 jours [108]	43
Figure II.11 :Conductivité thermique [108]	44
Figure II.12 :Montée capillaire dans les échantillons [108]	44
Figure III.1 : Matériel utilisé dans cette étude	48
Figure III.2 :Distribution granulométrique des sols utilisés	49
Figure III.3 : Essai des limites d'Atterberg	50
Figure III.4 :Préparation des échantillons : a) remplissage des moules, b) démoulage, c) conservation des échantillons dans un film plastique et d) échantillons au four à 65°C.	53
Figure III.5 :Essai de résistance à la compression	54
Figure III.6 :Essai de résistance à la flexion	55
Figure III.7 :Résistance à la compression de la chaux	57
Figure III.8 :Résistance à la compression du ciment	59
Figure III.9 Résistance à la flexion de la chaux	61
Figure III.10 : Résistance à la flexion du ciment	62
Figure III.11 :Variation de l'absorption totale en fonction de la teneur en chaux	63
Figure III.12 :Variation de l'absorption totale en fonction de la teneur en ciment	64
Figure IV.1 : Les trois couches d'un masque facial	68
Figure IV.2 :Dimensions des pièces de masques chirurgicaux considérées dans cette étude : (a) MiS et (b) MiL.	68
Figure IV.3 :Préparation des échantillons : a) Préparation du mélange, b) Préparation des moules, c) Remplissage des moules, d) Démoulage, e) Conservation des échantillons dans un film plastique et f) Échantillons au four à 65°C g) Échantillons prêts à l'emploi	70
Figure IV.4 : Test de vitesse de propagation	72
Figure IV.5 :a) Essai de résistance à la compression b) Essai de résistance à la flexion	72
Figure IV.6 :Test thermique	73
Figure IV.7 :Variation de la densité apparente	75
Figure IV.8 : Variation de la vitesse de l'ultra-son	76
Figure IV.9 :Variation de l'absorption totale en fonction de FM	77
Figure IV.10 :Effet de la teneur en FM sur le comportement mécanique en compression : (a) FM 0,5x1cm ² , (b) FM 1x2cm ²	79
Figure IV.11 : Effet de la coupe FM sur la cohésion de la brique de terre	79
Figure IV.12 : Effet de la teneur en FM sur la résistance à la compression	81
Figure IV.13 : Module d'élasticité de la fonction FM	81

Figure IV.14 : Résistance à la flexion en fonction de FM (a) FM 0,5x1cm ² , (b) FM 1x2cm ² (c)	
Résistance maximale à la flexion	84
Figure IV.15 :Modules élastiques en flexion de FM	85
Figure IV.16 : Conductivité thermique en fonction FM	86
Figure IV.17 :Effet de la teneur en FM sur la chaleur spécifique	89
Figure IV.18 :Effet de la teneur en FM sur l'effusivité thermique	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Aperçu des études sur l'utilisation des déchets industriels comme additifs dans la fabrication d'agrégats de sol non brûlés	19
Tableau II.1 : Matières premières des équipements de protection individuelle	30
Tableau II.2 : Estimation de la production totale de déchets plastiques due à COVID-19 par région, mesurée en tonnes [90]	32
Tableau II.3 : Aperçu de la recherche sur les additifs des déchets de masques médicaux dans les matériaux de construction	38
Tableau II.4 : Composition du mortier (kg/m ³) [108].	43
Tableau III .1 : Composition chimique des sols étudiés	48
Tableau III.2 :Composition minérale des sols étudiés	49
Tableau III .3 :Résultats du test de consistance du sol	50
Tableau III .4 :Propriétés chimiques et physiques de la chaux utilisée.	51
Tableau III .5 :Propriétés physiques et chimiques du ciment.	51
Tableau III.6 :Composition des mélanges	53
Tableau IV.1 : Propriétés physiques des pièces des masques chirurgicales	69
Tableau IV.2:Composition des mélanges	71
Tableau IV.3: Paramètres mécaniques de compression du FM	80
Tableau IV.4:Paramètres mécaniques en flexion de FM	84

LISTE DES SYMBOLES

Abréviation	Signification
NF P:	Norme Française du domaine P : bâtiment et travaux publics
EN:	Norme Européenne
ASTM:	American Society for Testing and Materials
ISO :	International Organization for Standardization
WL:	La limite de liquidité
PL :	limite de plasticité
PI :	indice de plasticité
Rc :	Résistance à la compression
σ_f :	Contrainte de flexion
ATE :	L'eau totale absorbée
C_b :	Coefficient de résistance à la remontée capillaire
C-S-H :	Hydrates de silicate de calcium
C-A-H :	Hydrates d'aluminate de calcium
FM:	Masques médicaux
MiS :	Masque médical découpé 0,5 × 1 cm ²
MiL :	Masque médical découpé 1 × 2 cm ²
ρ :	Densité apparente
Pw:	Masse volumique de l'eau
CT :	Conductivité thermique
C :	Capacité thermique
Cp :	Chaleur spécifique
ρ :	La densité apparente
e :	Effusivité thermique
λ :	Conductivité thermique

INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche visant à développer des matériaux de construction locaux, durables et respectueux de l'environnement. Elle repose sur une double approche intégrée : d'une part, l'amélioration des performances de la brique en terre crue, un matériau traditionnel largement utilisé dans le domaine de la construction ; d'autre part, la valorisation des déchets d'origine médicale, en particulier les masques chirurgicaux usagés, dont l'accumulation massive depuis la pandémie de Covid-19 constitue un enjeu environnemental majeur.

Dans un contexte mondial marqué par l'augmentation constante des déchets issus des activités humaines, la gestion et la valorisation de ces déchets constituent aujourd'hui un défi majeur pour les sociétés modernes. Le secteur de la construction, en tant que grand consommateur de ressources naturelles et important générateur de déchets tout au long du cycle de vie des ouvrages, est l'un des secteurs les plus concernés par cette problématique. Cette situation impose de repenser les pratiques traditionnelles et encourage la recherche de solutions alternatives fondées sur le recyclage, la réutilisation et la valorisation des déchets dans la fabrication des matériaux de construction.

La valorisation des déchets, c'est-à-dire leur transformation en ressources exploitables, constitue une stratégie fondamentale pour le développement durable. Elle permet non seulement de réduire l'impact environnemental lié à leur accumulation, mais aussi de créer de la valeur ajoutée à partir de matériaux initialement considérés comme inutilisables. Dans ce contexte, la brique d'argile occupe une place importante en tant que matériau de construction traditionnel, largement répandu et économiquement accessible. Elle nécessite toutefois une amélioration de ses propriétés physiques et mécaniques pour répondre aux exigences de la construction moderne.

Cette étude se concentre donc spécifiquement sur l'intégration des déchets de masques chirurgicaux dans la fabrication de briques en terre crue. Cette approche vise à évaluer la possibilité de transformer ces déchets médicaux en un additif utile, capable d'améliorer ou d'influencer les performances du matériau, tout en réduisant son impact environnemental. L'objectif final est de proposer une solution de construction locale durable et économiquement viable, s'inscrivant dans la logique de l'économie circulaire et du développement durable.

2 Motivations du choix des déchets de masques faciaux médicaux

Face aux défis environnementaux croissants engendrés par l'accumulation des déchets plastiques, notamment des masques chirurgicaux [01], qui se sont imposés dans la vie

quotidienne durant la pandémie de COVID-19. De ce fait, il semble impératif de développer des solutions innovantes pour leur traitement et leur valorisation.



Figure.1 : déchets médicaux (Sources Internet)

Selon des estimations scientifiques, plus de 6600 millions de masques, représentant environ 2640,79 tonnes, sont utilisés quotidiennement à travers le monde [02], ce qui fait des masques chirurgicaux une source majeure de déchets plastiques non biodégradables. Dans ce contexte, le polypropylène, principal matériau constitutif de ces masques, se distingue par ses excellentes propriétés mécaniques, telles que la légèreté et la durabilité [03], le rendant particulièrement adapté à une réutilisation dans divers domaines, notamment dans l'industrie des matériaux de construction. En intégrant ces déchets en tant qu'additifs, leur accumulation dans l'environnement peut être significativement réduite, tout en améliorant certaines propriétés des briques d'argile, telles que la résistance à la compression et la densité, contribuant ainsi à renforcer la durabilité du secteur de la construction.

3 Motivations du choix des briques de terre

La brique d'argile est l'un des matériaux de construction les plus anciens utilisés par l'homme depuis des millénaires [04, 05], en raison de ses propriétés thermiques, environnementales et économiques qui en ont fait un matériau de prédilection, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Il est fabriqué à partir d'un mélange de terre et d'eau, puis moulé et séché naturellement ou soumis à une cuisson thermique selon les exigences d'utilisation. Il se distingue également par sa disponibilité locale, sa recyclabilité et son faible impact environnemental par rapport aux matériaux de construction modernes, ce qui le rend conforme aux principes de la construction durable.

Malgré ces avantages, la brique d'argile présente certains inconvénients techniques, notamment une faible résistance à la compression et une forte absorption d'eau, ce qui peut affecter sa durabilité et sa stabilité, en particulier dans les environnements humides. C'est

pourquoi on a eu recours à des matériaux liants tels que le ciment et la chaux pour améliorer ses propriétés mécaniques et physiques. Dans le cadre de cette étude, la brique de terre crue a été choisie comme matériau de base en raison de son potentiel de développement et de son interaction positive avec les additifs externes.

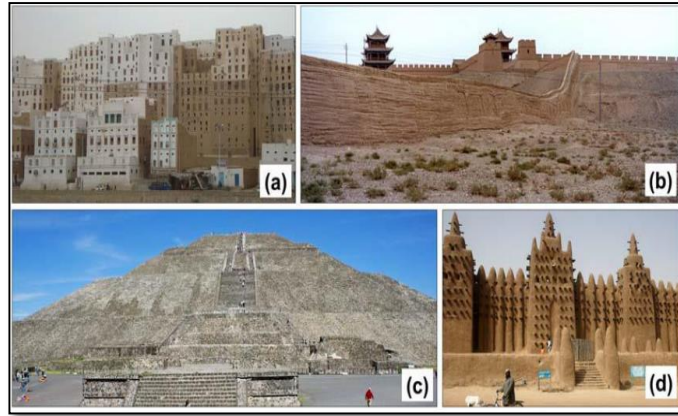


Figure 2: Exemples de constructions en terre à travers le monde a) Yémen, b) Chine c) Mexique d) Mosquée du Mali (Sources Internet)

4 Objectif principal de la recherche

La Cette recherche vise à valoriser les déchets médicaux, en particulier les masques chirurgicaux, en les intégrant dans des briques d'argile afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques et physiques, tout en réduisant l'impact environnemental de ces déchets. L'étude cherche également à optimiser la composition des briques en sélectionnant le type de terre et le liant approprié (chaux ou ciment) et en déterminant leur proportion optimale. Ce travail s'inscrit dans les principes de l'économie circulaire en réutilisant les déchets dans des matériaux de construction durables, économiques et adaptés aux environnements aux ressources limitées.

- Objectifs spécifiques

Le présent travail a pour ambition de poursuivre un ensemble d'objectifs scientifiques et appliqués, que l'on peut synthétiser de la manière suivante :

- Déterminer le type de sol le plus adapté à la fabrication de briques en terre crue.
- Étudier l'influence du type de liant (chaux ou ciment) sur les propriétés des briques et choisir le liant le plus efficace.
- Déterminer la proportion optimale de liant afin d'obtenir le meilleur équilibre entre performances mécaniques et coût économique. Incorporer des déchets de masques médicaux dans la composition des briques de terre après avoir déterminé le matériau et le stabilisateur optimaux.

- Intégrer les déchets de masques médicaux dans la composition des briques après avoir déterminé le sol et le liant optimaux.
- Évaluer l'impact de l'ajout de masques sur les propriétés mécaniques, physiques et thermiques des briques.
- Étudier la faisabilité technique et environnementale de la réutilisation des masques chirurgicaux dans les matériaux de construction.
- Proposer une solution pratique et durable contribuant à réduire les déchets et à améliorer la qualité des matériaux de construction locaux..

CHAPITRE I
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LES BRIQUES DE TERRE

I.1 Introduction:

Dans un contexte marqué par des enjeux environnementaux croissants, précisément ceux liés à la dégradation des écosystèmes et à la pression croissante exercée sur les ressources naturelles et énergétiques par la production et l'utilisation de matériaux industriels, la construction en terre suscite un intérêt grandissant. Elle est désormais reconnue comme une alternative à la fois écologique et économique, en adéquation avec les principes du développement durable. La terre, matériau localement disponible et à faible impact environnemental, offre en outre une grande diversité de techniques et de formes constructives.

Cela étant, malgré ses nombreux atouts, la construction en terre demeure confrontée à certaines contraintes techniques, en particulier la faible résistance mécanique des sols naturels ainsi que leur forte sensibilité à l'humidité et à l'eau, ce qui limite leur performance dans les milieux humides. À cela s'ajoute l'absence des normes de conception et d'ingénierie clairement établies, encadrant l'usage des briques de terre crue, et constitue dès lors un obstacle majeur à leur diffusion dans les projets de construction contemporains [06, 07].

En vue de remédier à ces contraintes, diverses techniques de stabilisation ont été développées dans le but d'améliorer les propriétés du sol, par le biais d'interventions physiques ou chimiques. Parmi ces dernières, l'utilisation d'additifs tels que la chaux et le ciment demeure la plus répandue, en raison de leur capacité à renforcer la cohésion du matériau et à accroître sa résistance mécanique.

Au regard de ces considérations, une orientation récente de la recherche s'est affirmée, visant à valoriser différents déchets industriels par leur incorporation dans la fabrication des briques de terre. Cette approche poursuit un double objectif : d'une part, l'amélioration des performances des matériaux de construction, ; d'une autre part, la réalisation d'objectifs environnementaux majeurs, tels que la réduction de la pollution, la limitation de l'accumulation des déchets et la promotion des principes de l'économie circulaire.

I.2 Construction en terre entre passé et présent.

Les chercheurs ; d'un côté, ne s'accordent pas sur la date exacte à laquelle l'homme a commencé à utiliser la terre comme matériau de construction, mais les preuves archéologiques indiquent que cette méthode est très ancienne. Dans ce contexte, Mink [8] suggère que l'adoption de la construction en terre pourrait remonter à plus de 9 000 ans, sur la base de la découverte de brique de terre (briques d'adobe) au Turkménistan, datant de 8 000 à 6 000 ans avant J.-C. D'un autre côté, certains chercheurs [9] estiment que les premières utilisations de la terre dans la construction remontent à l'époque des esclaves en Mésopotamie, entre 5000 et 4

000 avant J.-C. Les structures en terre sont réparties sur les différents continents, ce qui témoigne du caractère universel de ce mode de construction [10].



Figure I.1: Carte des régions de construction traditionnelle dans le monde, avec les sites du patrimoine mondial de l'UNESCO [10]

L'Algérie, ce pays de paysage multiple, dispose d'un patrimoine architectural en terre d'une grande richesse, illustré par de nombreux édifices et ensembles traditionnels qui s'inscrivent pleinement dans l'identité historique et culturelle du pays. Parmi les exemples les plus emblématiques figure le palais de Khenga Sidi Naji, situé à Biskra, dans le sud de l'espace algérien, édifié il y a plusieurs siècles à partir de briques de terre crue [11].

Selon les estimations, environ 50 % de la population mondiale réside dans des habitations en terre, majoritairement localisées dans les pays en développement, mais également présentes dans plusieurs pays industrialisés, tels que l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni, où l'on recense plus de 500 000 logements construits en terre [12]. Ce mode constructif connaît par ailleurs un essor notable aux États-Unis, au Brésil et en Australie, porté par la montée en puissance des approches de construction durable, lesquelles privilégient l'emploi de matériaux naturels et à faible impact environnemental.

Le laboratoire français **CRA Terre** est l'une des institutions les plus reconnues au monde pour la promotion de la construction en terre, officiellement reconnu par le gouvernement français depuis 1986 [13]. L'Allemagne a été pionnière dans ce domaine, avec la publication du premier code de construction en terre en 1944, suivie des normes **DIN 18951** et **Lehmbau Regeln** en 1998, adoptées dans la majorité des Länder, à l'exception de Hambourg et de la Basse-Saxe [08].

De même, l'Autriche figure parmi les premiers pays à avoir encadré réglementairement ce secteur, tandis que l'Australie a adopté sa première réglementation en 1952 via le **CSIRO**, révisée et actualisée en 2002 [14]. En Espagne, le ministère des Transports a publié, en 1992, un document technique visant à promouvoir la construction en terre battue et en briques d'adobe, bien qu'aucune réglementation spécifique ne soit encore officiellement établie pour ces dernières [15]. L'intérêt croissant pour les pratiques de construction durable constitue le principal moteur de cette dynamique d'expansion.

I.3 Techniques de construction avec des matériaux en terre

Ces pratiques constructives à base de terre crue, constituent l'une des méthodes architecturales les plus anciennes et les plus universellement reconnues, étant considérée comme le premier matériau de construction exploité par l'homme. Plusieurs techniques de construction en terre crue se sont développées, chacune reposant sur un type de sol spécifique, caractérisé par une composition particulière. Parmi ces méthodes, cinq se distinguent par leur fréquence d'utilisation et leur diffusion à travers le monde, à savoir : **le pisé**, **Terre-paille**, **Torchis**, **blocs de terre compactée** Et les **Adobe**

➤ Le pisé

Une telle technique ancestrale des murs en **pisé** constitue une technique traditionnelle consistant à compacter de la terre humide dans des coffrages temporaires afin de former des murs porteurs, comme l'illustre la figure I.2. Cette méthode s'inscrit dans les procédés de construction dits «à cru», c'est-à-dire réalisés sans cuisson, et bénéficie d'un héritage historique considérable ainsi que d'une large diffusion géographique. Elle est notamment employée en Afrique du Nord, en Australie, sur le continent américain, en Chine et en Europe, y compris au Royaume-Uni, où son utilisation remonte à plus de deux siècles [14,16].



Figure I.2: construction en pisé (Sources Internet)

➤ Terre-paille

Ce composite terre-paille constitue un assemblage naturel résultant du mélange de terre argileuse, d'eau et de paille hachée, comme l'illustre la figure I.3. Dans ce mélange, l'argile joue le rôle de liant, encapsulant les fibres de paille et assurant la cohésion du matériau, tandis que la paille renforce la résistance à la traction et améliore les propriétés d'isolation thermique. Fréquemment employé comme matériau de remplissage au sein de structures en bois, ce mélange est comprimé dans les cavités mural puis laissé à sécher, donnant naissance à des murs durables, perméables à l'air et présentant une performance énergétique élevée [17].



Figure I.3: Fabriquer des Terre-paille [Sources Internet]

➤ Torchis

La technique de **Torchis** se fonde sur une structure en bois remplie d'un mélange de terre et de fibres végétales, le plus souvent de la paille. La terre, mélangée à l'eau pour obtenir une pâte plastique, est appliquée sur les planches de bois afin d'assurer un recouvrement complet. Le matériau est ensuite compacté pour garantir une épaisseur uniforme, comme l'illustre la figure I.4. Une fois le mélange séché, il est généralement recouvert d'une couche supplémentaire de terre, et sa cohésion peut être renforcée par l'ajout de chaux ou d'un mélange de chaux et de sable [18].



Figure I.4: Fabriquer des constructions en torchis (Sources Internet)

➤ Adobe

Une technique appelée **Adobe** est faite de construction en terre relativement simple qui était utilisée dans la quasi-totalité des bâtiments anciens. Ces briques sont préparées à partir d'un mélange de terre argileuse et d'eau comme matériaux de base. Le mot « adobe » est dérivé du mot arabe « atop », qui signifie « brique séchée au soleil ». Le processus de fabrication des briques d'adobe consiste à remplir des moules en bois avec de la terre humide et à les faire sécher au soleil. Étant donné que le retrait peut provoquer des fissures à la surface des briques lorsqu'elles sèchent, de nombreux chercheurs [19,20] recommandent d'ajouter de la paille ou d'autres fibres végétales pour éviter que cela ne se produise

➤ Blocs de terre compactée

Cet élément en terre compactée s'inscrit dans l'évolution contemporaine des technologies de la maçonnerie et constitue une version perfectionnée des blocs de pisé moulés. Selon cette méthode, la terre est soumise à une compression mécanique au moyen d'une presse, ce qui permet d'améliorer les performances mécaniques des blocs et de renforcer leur résistance aux effets de l'humidité et de l'eau. Les dimensions obtenues varient en fonction du type de presse et du moule employés lors du processus de fabrication [21, 22].



Figure I.5: Fabriquer des constructions en Blocs de terre compactée (Sources Internet)

I.4 Rappel sur l'argile

L'argile se définit comme un matériau naturel à granulométrie très fine, présentant des propriétés plastiques lorsqu'elle est associée à une teneur en eau appropriée. Elle est essentiellement constituée de particules dont le diamètre est généralement inférieur à 0,002 mm, correspondant le plus souvent à des minéraux argileux cristallins, tels que des silicates hydratés d'aluminium ou de magnésium. Ces minéraux se distinguent par des caractéristiques physiques

et mécaniques spécifiques, étroitement dépendantes de leur composition chimique et de la finesse de leurs grains [23].

Cette présentation conceptuelle de l'argile ne repose pas sur l'origine du matériau, mais plutôt sur ses propriétés physiques, telles que la plasticité, la texture molle et la composition minérale. Ces propriétés sont interdépendantes ; une plasticité élevée ; par exemple, est directement liée à la souplesse des grains et à la nature des minéraux argileux qui composent l'argile.

Dans une perspective généralisée, le terme « matériaux argileux » englobe une gamme de matériaux naturels qui partagent les trois caractéristiques de base : La plasticité, la douceur granulaire et la composition en minéraux silicatés [24], comme l'argile, le schiste et les sols à grains fins. D'autres matériaux fins tels que la bauxite ou la limonite, malgré leur petite taille, ne sont pas considérés comme de l'argile car ils ne possèdent pas les propriétés texturales et minéralogiques de base de l'argile.

I.4.1 Familles de l'argile

Nombreux sont les types d'argiles ; néanmoins, trois de ces types de minéraux argileux sont majoritairement rencontrés :

➤ La kaolinite

Ce type est un minéral argileux appartenant au groupe des phyllosilicates, avec une structure en couches 1 :1 ([figure I.6](#)), où chaque couche contient deux lamelles : l'alumine octaédrique et la silice tétraédrique, liées par un plan commun d'atomes d'oxygène. La kaolinite se forme à la suite de processus d'altération chimique avancés et est l'un des minéraux les plus abondants dans les sols et les dépôts naturels. La structure de la kaolinite est bien compacte et non extensible, ce qui la rend moins réactive que d'autres minéraux argileux tels que la smaltite. En raison de sa structure stable et de sa grande stabilité moléculaire, le phénomène de substitution isomorphe est limité ou inexistant. La plupart des activités d'adsorption se concentrent sur les bords et les surfaces de ses molécules, car ses couches ne se séparent pas facilement. La présence de groupes hydroxyles sur les surfaces internes et externes joue un rôle important dans les réactions chimiques, en particulier dans l'adsorption des métaux, qui est influencée par le pH du milieu environnant. Grâce à ces propriétés, la kaolinite renforce la stabilité mécanique du sol et peut former une barrière argileuse efficace pour limiter la migration des contaminants, ce qui lui confère une grande importance dans les applications géologiques, environnementales et d'ingénierie [25,26].

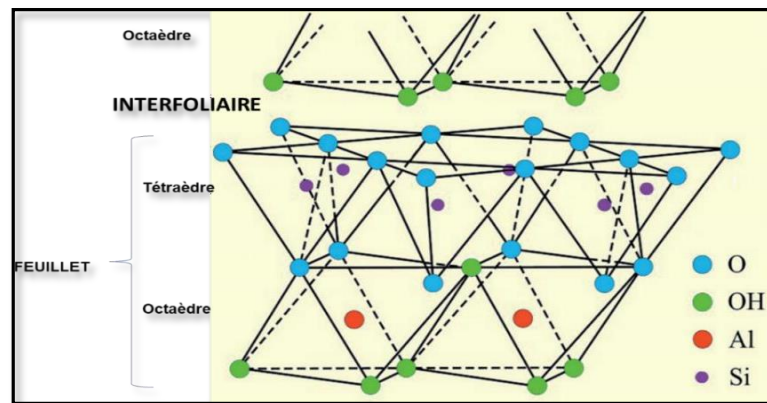


Figure I.6: Structure de la kaolinite, version modifiée d'après Grim (1962) [27].

➤ L'illite

Un tel type est l'un des minéraux argileux de la famille des micas, caractérisé par une structure cristalline 2 : 1 (**figure I.7**), où son unité structurale consiste en deux couches de tétraèdres de silice séparées par une couche intermédiaire d'octaèdres d'alumine, séparés par des ions de potassium (K^+) qui résident de façon stable dans des cavités hexagonales entre les couches, empêchant la pénétration de l'eau ou de molécules polaires dans les espaces interstitiels. Cette propriété lui confère une grande stabilité par rapport à d'autres minéraux argileux tels que la smectite. L'illite présente un degré limité de substitution ionique dans la couche quaternaire, où une partie des ions de silicium est remplacée par des ions d'aluminium, avec la possibilité d'une substitution supplémentaire dans la couche octaédrique pour des ions de magnésium ou de fer. Cette structure produit une charge négative interne d'environ 1,3 à 1,5 par unité cristalline, supérieure à celle de la smectite, ce qui contribue à la cohésion des couches et empêche un échange rapide d'ions. L'illite est généralement formée par l'altération de minéraux silicatés, en particulier les feldspaths, ou par des transformations minérales de micas telles que la muscovite. L'illite est un constituant majeur des schistes à grains fins et se trouve couramment dans des environnements riches en éléments tels que l'aluminium et le calcium, en particulier dans des conditions alcalines. L'illite est l'un des minéraux argileux les plus courants dans les sédiments à grain fin, souvent en association avec d'autres minéraux tels que la kaolinite et la vermiculite. Sa répartition et sa composition dépendent de la qualité de la roche mère et des conditions d'altération subies par la région [28].

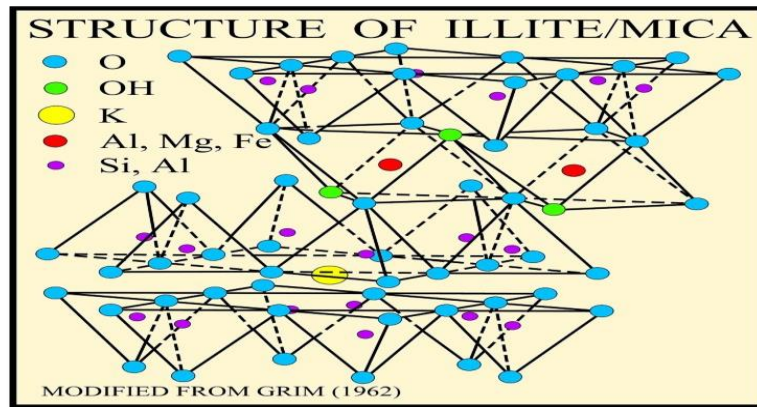


Figure I.7 Structure de l'illite (USGS) [28].

➤ La montmorillonite

La montmorillonite est un minéral argileux appartenant au groupe des smectites, caractérisé par une structure cristalline 2:1 (**figure I.8**) composée de feuillets de silicate reliés entre eux par de faibles liaisons de van der Waals, permettant aux molécules d'eau et à d'autres substances de pénétrer dans les espaces interstitiels entre les feuillets. Cette structure lui confère une grande capacité à gonfler lorsqu'il interagit avec l'eau et lui confère d'importantes propriétés physiques telles qu'une cohésion et une flexibilité élevées. Les ions d'aluminium peuvent remplacer le silicium dans les feuillets tétraédriques, ou les ions de magnésium ou de fer pouvant remplacer l'aluminium dans les feuillets octaédriques, qui génèrent une charge négative, compensée par des ions positifs tels que le sodium (Na^+) ou le calcium (Ca^{2+}). Ces derniers sont interchangeables et ne sont pas liés de manière permanente aux feuillets, ce qui rend la montmorillonite chimiquement active. Ce minéral se présente sous deux formes principales : la montmorillonite sodique, très gonflante et largement utilisée dans le forage des puits de pétrole et dans l'industrie cosmétique, et la montmorillonite calcique, moins gonflante et utilisée dans le blanchiment des huiles. La montmorillonite est généralement formée par l'altération des roches riches en fer et en manganèse, en particulier dans les régions chaudes et pluvieuses, et l'un des types les plus connus est l'argile benthonique, qui résulte de la décomposition des cendres volcaniques [29].

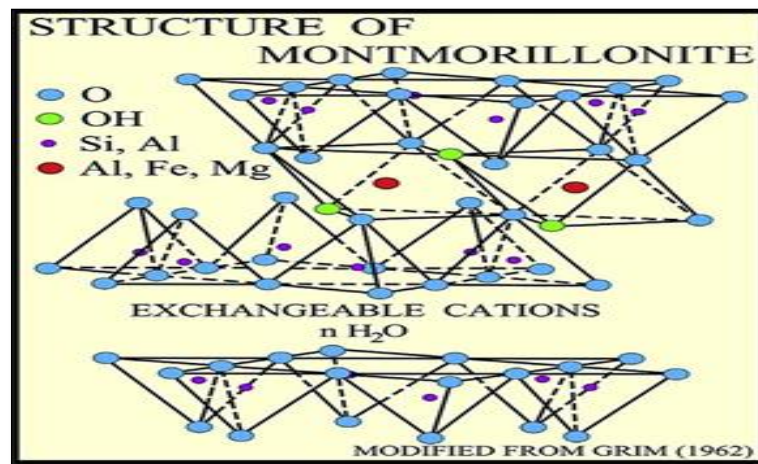


Figure I.8 : Structure du minéral smectite, la montmorillonite[30].

I.4.2 Techniques de stabilisation des matériaux en terre

Les techniques de stabilisation des sols sont définies comme « *un processus de modification contrôlée de la structure, de la composition et des propriétés physiques et mécaniques du sol, dans le but d'améliorer ses performances et de le rendre apte à être utilisé dans des applications structurelles* » [31]. Ces procédés se déclinent en plusieurs modalités, parmi lesquelles figurent la **stabilisation physique**, reposant sur l'ajustement de la granulométrie et des propriétés plastiques du sol ; la **stabilisation mécanique**, fondée en particulier, sur le compactage visant à accroître l'interaction intergranulaire et les forces de friction ; ainsi que la **stabilisation par liants inorganiques**, tels que le ciment et la chaux, destinés à renforcer la résistance mécanique, la durabilité et le comportement du matériau face à l'humidité..

I.4.2.1 Stabilisation mécanique

Le compactage mécanique est l'un des principaux moyens efficaces pour l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques du sol ; en effet, il contribue directement à augmenter sa densité en réduisant les espaces interstitiels entre ses grains [32]. L'importance de ce processus réside dans sa capacité à progresser la liaison interne entre les particules, ce qui permet d'obtenir un matériau plus cohésif et plus résistant à la charge.

Parmi les diverses techniques de compression, nous avons la dite, dynamique qui est plus efficace que celle de la compression statique ou vibratoire. Pour cela, des études ont montré que celle-là offre une résistance à la compression nettement supérieure, ainsi qu'elle est plus performante à celle de la compression statique ou vibratoire [33]. Cette amélioration des

performances est due à la capacité du compactage dynamique à réarranger les granulés de manière plus cohésive et à les répartir de manière homogène dans l'agrégat.

Dans cette optique, Guettala et Al [34] ont entrepris une recherche dont l'objectif est d'analyser l'effet de la contrainte de compression sur les propriétés des blocs de terre compactés (BTC). Leurs résultats ont révélé que l'augmentation de la contrainte appliquée lors du processus de compactage entraîne une amélioration notable de la résistance à la compression des blocs, tout en réduisant les taux d'absorption capillaire, ce qui contribue à leur durabilité sur le long terme. Ces observations mettent en évidence le rôle déterminant de la contrainte de compression dans l'optimisation des performances des matériaux en terre comprimée, comme l'illustre la [figure I.9](#).

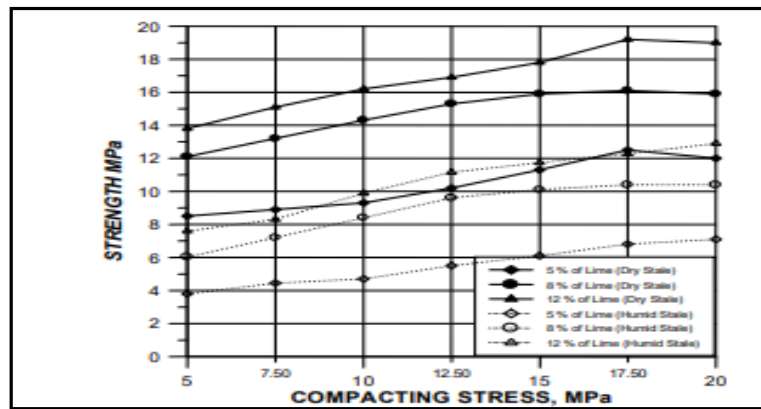


Figure I.9: Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en chaux sur la résistance mécanique [34].

I.4.2.2 Stabilisation physique

Ce procédé opératoire est une technique visant à optimiser la texture et les propriétés physiques des sols en ajustant la distribution des grains au sein du sol. Izemmouren et Guettala [35] ont entrepris une recherche sur l'effet de la proportion de sable sur la résistance et la durabilité des sols argileux traités. Dans cette étude, deux types de sable concassé ont été utilisés pour modifier la distribution de la taille des particules dans le sol. Les résultats ont montré que les propriétés mécaniques du sol s'amélioraient de manière significative avec l'augmentation de la teneur en sable, comme le montre la [figure I.10](#).

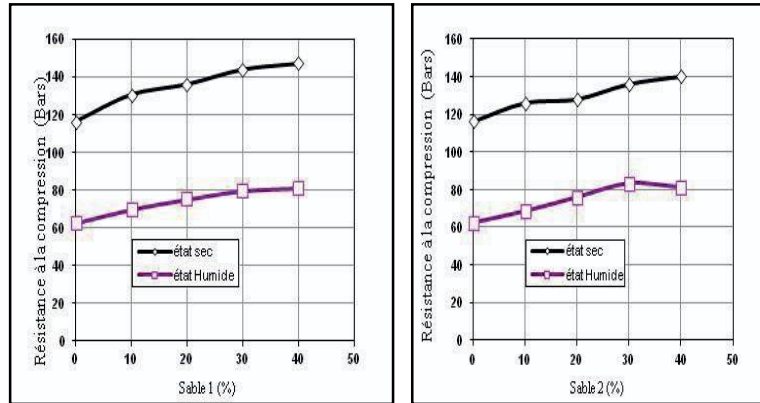


Figure I.10 : Relation entre la teneur en sable et la résistance à la compression du sol dans des conditions sèches et humides [35]

I.4.2.3 Stabilisateurs chimiques

Cette technique du sol consiste à améliorer les propriétés du sol par l'ajout de substances ou de composés chimiques qui interagissent avec les composants du sol. Ce type de stabilisation repose sur une réaction physico-chimique entre les particules du sol et la substance ajoutée, ce qui aura pour effet soit d'assembler les particules entre elles, soit de les incorporer au sein d'une matrice solide. La réaction la plus significative de ce processus est la réaction pouzzolanique, qui se produit, par exemple, lorsque la chaux est combinée à l'argile, entraînant la formation de composés contribuant à l'amélioration de la résistance et de la durabilité du sol. Parmi les stabilisateurs les plus couramment employés figurent le ciment, la chaux, le bitume et les résines, le choix du type de stabilisant dépendant de la nature du sol ainsi que des performances requises.

I.4.2.3.1 Ciment

L'ajout du ciment au mélange de brique de terre est un procédé efficace pour améliorer ses propriétés mécaniques, notamment en termes de résistance à la compression et à la traction. Les recherches indiquent que l'ajout de quantités de ciment à l'argile augmente de manière significative la résistance à la compression et à la traction des briques obtenues, et l'étude de Dao et al [36] a montré que l'ajout du ciment contribuait de manière significative à l'amélioration de ces propriétés. En outre, le ciment réduit la perméabilité des briques à l'eau, ce qui renforce leur résistance à l'humidité et améliore leur durabilité à long terme.

Cependant, Il convient de souligner que de faibles pourcentages de ciment, tels que 2 %, peuvent initialement entraîner une diminution de la résistance à la compression des briques

d'argile, avant que cette résistance ne commence à s'améliorer à mesure que le pourcentage de ciment dans le mélange augmente [37]. De la sorte, une détermination minutieuse de la proportion optimale de ciment est qualifiée de nécessaire pour garantir la meilleure performance mécanique de la brique en terre cuite sans affecter négativement ses propriétés de base

➤ Mécanismes d'hydratation du ciment

Ce processus est défini comme une série de réactions chimiques qui commencent immédiatement après le mélange du ciment avec l'eau. Les composants principaux, tels que le silicate tricalcique (C_3S)

et le silicate di calcique (C_2S), se dissolvent alors dans l'eau, libérant des ions qui réagissent entre eux pour former les produits finaux de l'hydratation, principalement le gel de silicate de calcium hydraté ($C-S-H$), responsable de la résistance et de la cohésion du matériau, ainsi que l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) en tant que produit secondaire [38,39].

L'hydratation se déroule en plusieurs étapes successives : une réaction initiale rapide, suivie d'une période de latence, puis d'une phase d'accélération, et enfin d'une phase de décélération progressive. Ce processus est influencé par plusieurs facteurs tels que la température, le rapport eau/ciment, et la présence d'additifs ou de déchets. L'hydratation constitue ainsi la base du développement de la microstructure du béton ou de la brique, et de l'acquisition de ses propriétés mécaniques et physiques.

I.4.2.3.2 Chaux

La chaux est un stabilisateur chimique utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques des briques d'argile. Celle-ci contribue essentiellement à renforcer la solidité et l'imperméabilité des briques, également à améliorer leur dureté et en terme final, à accroître leur stabilité mécanique. Néanmoins, il est fondamental de déterminer la proportion optimale de la chaux, car un dépassement de cette proportion peut avoir des effets négatifs sur le comportement de la brique en raison des réactions chimiques internes entre la chaux et les constituants du sol. Ces réactions peuvent produire de grandes quantités d'hydroxyde de calcium, provoquant des fissures internes dans la structure de la brique en raison de l'expansion causée par la formation de ce composant. Il convient de noter, aussi, que le ratio optimal de la chaux varie en fonction du type de sol, étant donné que ce ratio est lié aux composants chimiques et minéralogiques de chaque type de sol [40]. Dans l'étude menée par Khoudja et al. [41], le pourcentage optimal a été déterminé à 11 %. Layachi et al. [42] ont estimé ce taux à 10 %, tandis que l'étude d'Al-Zaidi [43] a révélé un pourcentage optimal de 12 %.

➤ Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique, comme le montre la [figure I.11](#), est un processus secondaire de stabilisation du sol, dans lequel le calcium réagit avec la silice et l'alumine présentées dans l'argile pour former des matériaux cimentaires supplémentaires, tels que le C-S-H et le C-A-H. Dans un environnement à pH élevé, la silice et l'alumine sont plus solubles, ce qui facilite la réaction avec les ions calcium. Les équations de base de la réaction pouzzolanique sont les suivantes :



Ces réactions se produisent lentement pendant des mois ou des années, contribuant à renforcer le sol amendé, à réduire la plasticité et à améliorer la granulométrie. Le stabilisateur doit pouvoir maintenir un pH élevé pendant une longue période pour que la réaction pouzzolanique puisse améliorer la résistance et la durabilité [44,45].

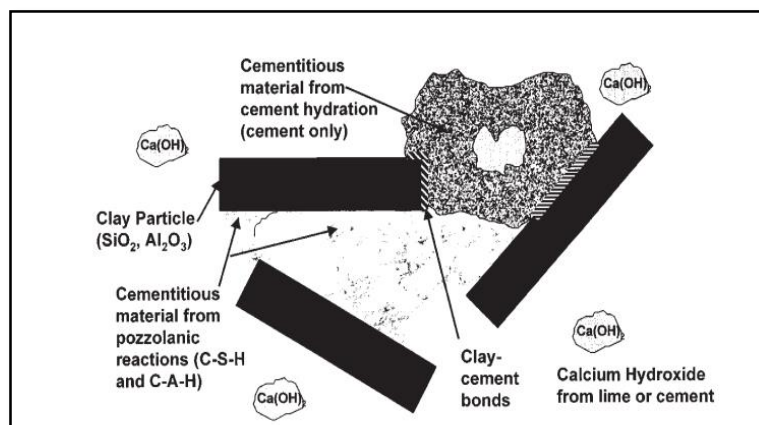


Figure I.11 : Réaction pouzzolanique[44].

➤ Carbonatation dans le cadre de la chaux

La carbonatation est une réaction chimique dans laquelle l'oxyde de calcium (CaO) est converti en carbonate de calcium (CaCO₃) en réagissant avec le dioxyde de carbone (CO₂) dans un environnement approprié, selon l'équation suivante : - $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$

Cette réaction est classée comme un processus exothermique, vu que la formation de carbonate de calcium s'accompagne d'une libération d'énergie thermique d'environ -182,1 kJ par mole.

Le rendement du processus de carbonatation dépend de plusieurs paramètres, parmi lesquels figurent principalement la température et la concentration en dioxyde de carbone (CO₂). Une élévation de la température accélère la cinétique réactionnelle ; toutefois, elle peut

entraîner une diminution du taux final de conversion en carbonate de calcium, en raison de son influence sur l'équilibre chimique. À l'inverse, des températures plus faibles ralentissent la réaction, mais favorisent une conversion plus élevée. En conséquence, l'optimisation des conditions de carbonatation repose sur un ajustement rigoureux entre les considérations thermodynamiques et la cinétique de réaction, afin de garantir un rendement optimal. [46,47].

Cette réaction de minéralisation du CO_2 , s'effectue en deux étapes : Une réaction rapide en surface suivie d'une autre plus lente à l'intérieur des particules en raison de leur structure poreuse.

I.4.3 L'utilisation de fibres naturelles et synthétiques dans la stabilisation des briques

Les fibres végétales occupent un rôle important dans l'amélioration des performances des brique de terre non cuites en renforçant leurs propriétés mécaniques et physiques telles que, la résistance à la compression, la résistance à la traction et la durabilité et l'isolation thermique ; ce qui les rend plus efficaces et plus durables que les matériaux traditionnels. Les fibres telles que le palmier dattier, le jute, la banane et la bagasse sont parmi les plus usuellement utilisées, offrant une bonne adhérence au sol, et cette performance pourrait être encore améliorée lorsqu'elles sont traitées avant toute utilisation [48].

➤ Classification des fibres naturelles

Les fibres naturelles sont ordinairement réparties en trois catégories capitales en fonction de leur source d'origine, comme l'illustre graphiquement la [figure I. 12](#)

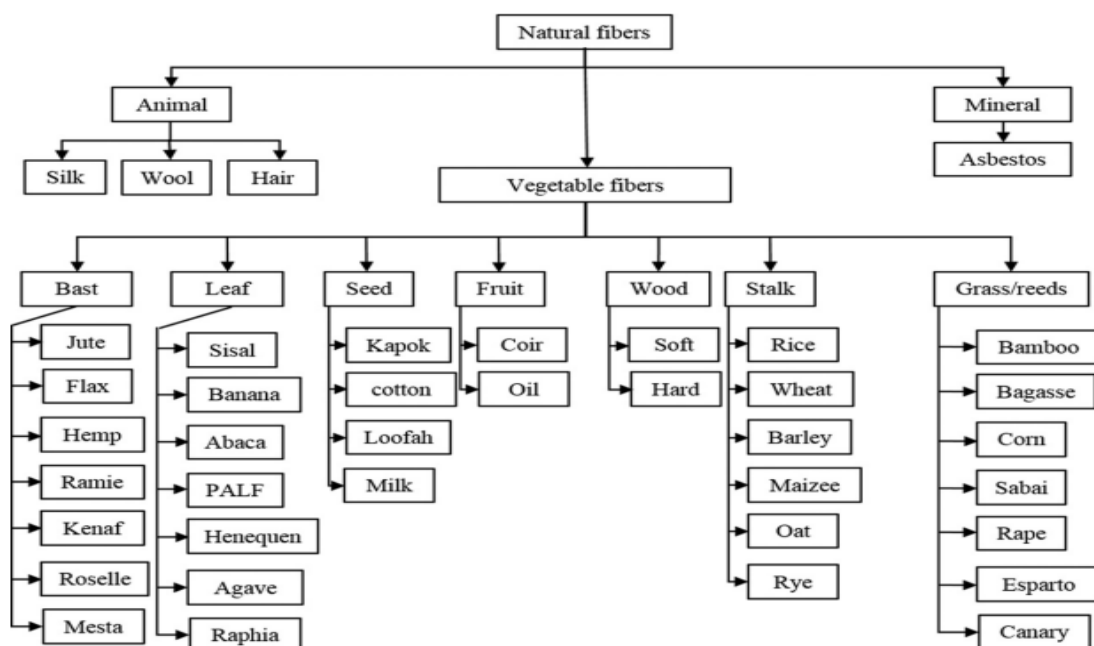


Figure I.12 Classification des fibres naturelles [49]

I.4.4 Effet des déchets industriels sur les propriétés des briques imbrûlées

Les déchets industriels désignent l'ensemble des matières résiduelles devenues inexploitable à l'issue des processus de production au sein de divers secteurs industriels, notamment les industries manufacturières, les unités de transformation et les activités minières (les minoteries : les usines et les mines). Ces résidus varient en fonction du type d'industrie et comprennent les cendres volantes, les cendres résiduelles, les métaux, le verre, les scories, les boues, les fibres plastiques et bien d'autres matériaux.

À titre d'exemple, les cendres volantes et les cendres résiduelles résultent de la combustion de combustibles solides au sein des centrales électriques, tandis que les scories sont générées par les procédés de l'industrie métallurgique. Quant aux boues, elles proviennent des stations d'épuration des eaux. Les rejets ou déchets de construction provenant de la démolition ou de la rénovation de bâtiments qui sont tant présents, tandis que les déchets de l'industrie des transports comprennent les pneus usagés ou d'autres pièces de véhicules. Les déchets de fibres tels que le verre, le polypropylène, le polyester et les textiles provenant de diverses industries sont aussi et tant présents, ce qui reflète la grande variété des déchets industriels [50].

L'élaboration de blocs de terre crue incorporant divers types de déchets solides constitue un enjeu majeur dans la quête de solutions constructives durables et respectueuses de l'environnement. Ce domaine a fait l'objet d'un intérêt scientifique considérable, comme l'illustre le **tableau I.1**, qui synthétise les résultats des recherches publiées dans la littérature spécialisée.

Tableau I.1 Aperçu des études sur l'utilisation des déchets industriels comme additifs dans la fabrication d'agréats de sol non brûlés

Déchets	Ref.	Contenu (% en poids, % en volume)	Type de sol, sable et argile	Résistance à la compression (Rc), Résistance à la flexion (FS) (MPa)
Cendres volantes	[51]	3, 6, 9, 12,15%	Sol naturel	CS 5.97
	[52]	4, 8,12%	Sol	CS 2.50
	[53]	5, 10, 15,20%	Lœss	CS-23.72
Laitier granulé de haut fourneau	[54]	5, 15, 25, 35,45%	Argile lithomargique	CS 5.55

Bottomash	[55]	75, 60,52.5%	Sol argileux latéritique et sable	CS 27
Polyéthylène téréphtalate	[56]	0.2,0.4,0.6,0.8,1	Sol local	CS 5.15
	[57]	1, 3,7%	Terre de bruyère locale	CS 1.55
	[58]	1, 3, 7, 15,20	Sol argileux local	CS-4.50
Crumb rubber	[59]	5, 10,20%	Produits de carrière et sable, Argile kaolinique	CS-10
Fibres de soie récupérées	[60]	1.7, 2,2.7	Sol latéritique	CS-11.60 FS-2.60
Charge d'alumine (AF) et Cendres de charbon (CA) Cendres de charbon (CA)	[61]	AF : 16.1, 32.2, 47.82%, CA : 7%	Terre argileuse grise Marl	CS-16
Poussière de brique	[62]	5, 10, 15,20%	Argile gréseuse de Mercia	CS-2.10
Oxyde de magnésium	[63]	3, 6, 9, 12, 15,18%	Argile rouge locale	CS-9.90
Résidu de carbonate de calcium	[64]	0–15%	Terre argileuse	CS-3.40
Granulats recyclés	[65]	15%	Sol local	CS-5.40
Résidus de molybdène	[66]	55, 60, 65, 70,75%	Rivières et fleuves	CS-27.35
Mines de fer poil	[67]	30, 40,50%	Poussière de quartz	CS-6
Carbonate de soude	[68]	4.38, 4.56, 4.74, 4.92%	Latéritique	CS-1.71
Polymère renforcé de fibres de verre polymère	[69]	25,50,75,100%	Latosol rouge, argile	CS-27.97
Déchets céramiques	[70]	50, 75,100%	Latérite	CS-33.60
Poussière marbrée (MD)	[71]	10,20%	Haspolat et Taskent sol	CS-3.47
Fibre plastique	[72]	0.1%	Argile	CS-7.10
Boues d'épuration	[73]	20,50%	Sable ordinaire	CS-30
Polystyrène expansé Polystyrène Perles	[42]	0,40,45,50,55,60,65%	Sol local	CS: 1.4 FS : 1.43

I.4.4.1 Effet des déchets industriels sur les propriétés thermiques des briques

Des études récentes ont mis en lumière que l'incorporation de certains déchets industriels dans la fabrication de brique de terre non cuites améliorent considérablement leurs propriétés thermiques. Cela est principalement dû à l'augmentation de la porosité et à la réduction de la densité, ce qui entraîne une réduction de la conductivité thermique et une amélioration de l'isolation. Dans l'étude de Safa Layachi et al [42], l'incorporation de billes de polystyrène expansé (EPS) entre 40 % et 65 % a réduit la conductivité thermique de 57,36 % et la capacité

thermique volumétrique de 29,78 %. Cela démontre l'efficacité du PSE en tant que matériau isolant. Cette amélioration est attribuée à la structure poreuse du PSE.

Dans l'étude de J. Alexandre Bogas et al [65], 15 % d'agréats recyclés ont été utilisés pour remplacer l'argile, ce qui a donné une conductivité thermique de 0,61-0,65 W/m-°C à l'état sec, ce qui est inférieur aux valeurs typiques des matériaux de construction conventionnels, alors qu'à l'état humide, elle a augmenté de 80 %. Cela suggère que les conditions environnementales devraient être prises en compte lors de l'évaluation de la performance thermique des matériaux renforcés par des résidus.

Rômulo Marçal Gandiaet al [69] ont procédé à l'utilisation des rejets de PRFV, et l'échantillon contenant 10 %, ce qui a engendré une diminution de la conductivité thermique et une légère augmentation du degré de stabilisation thermique, reflétant une amélioration de la performance thermique. Ceci était associé à une diminution de la densité et à une augmentation des micro-vides d'air dans la structure.

Ces résultats ont mis en évidence le rôle positif des déchets industriels dans l'amélioration de l'isolation thermique des briques de terre cuite, ceci en fait une option prometteuse dans le contexte de la construction durable et respectueuse de l'environnement.

I.4.4.2 Effet des résidus industriels sur les propriétés mécaniques des briques en terre

Des études contemporaines visent à améliorer les propriétés des briques de terre en utilisant une série de déchets pour améliorer leur résistance à la compression. Dans l'étude de Peter Donkor [56], des fibres de polypropylène (PP) ont été utilisées comme additif aux briques de terre et les résultats ont montré une augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à 0,4 %, où la résistance à la compression optimale était de 5,03 MPa. Il a été démontrée que l'ajout de fibres améliore les performances des briques, mais qu'au-delà de ce pourcentage, la résistance à la compression diminue en raison des interactions entre les fibres elles-mêmes et entre les fibres et la matrice d'argile. La [figure I.13](#) de l'étude montre comment la résistance à la compression augmente jusqu'à 0,4 % de la teneur en fibres, puis commence à diminuer au-delà de ce pourcentage.

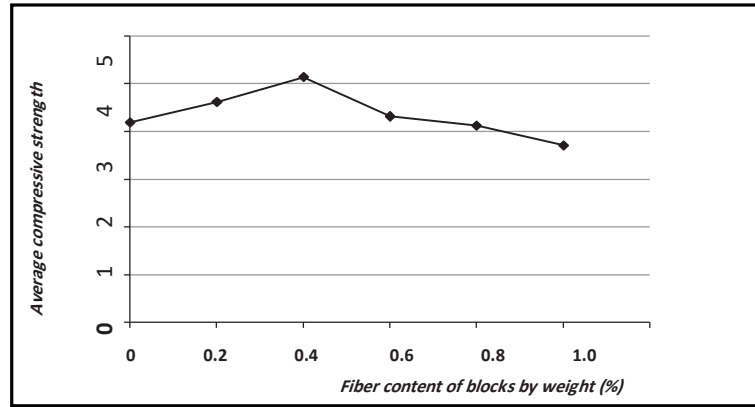


Figure I.13. Résistance moyenne à la compression du BTC en fonction de la teneur en fibres des blocs[56]

Dans les recherches de J.E. Oti [62], l'effet de l'ajout de poussière de brique (BDW) sur la résistance à la compression brique de terre a été testé. Les résultats ont montré que l'ajout de 20 % de BDW à l'argile optimisée entraînait une augmentation significative de la résistance à la compression allant jusqu'à 250 % par rapport à l'échantillon d'origine. La [figure I.14](#) montre que la résistance à la compression augmente progressivement avec le pourcentage de poussière de brique, ceci indique l'effet positif de ce déchet sur les briques d'argile, contribuant à l'amélioration des performances du matériau à long terme.

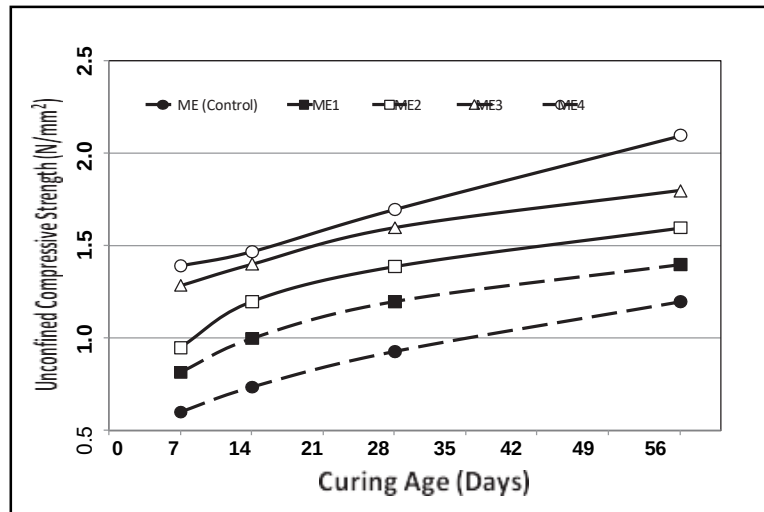


Figure I.14. Compressive strength development [62]

De même, dans le cadre des travaux menés par Houssame Limami [58], l'effet des additifs polymères tels que le polyéthylène haute densité (PEHD) et le polyéthylène téréphtalate (PET) sur la résistance à la compression des briques de terre a été testé. Les résultats ont montré que l'ajout de PEHD était plus efficace pour améliorer la résistance à la compression que le PET. La [figure I.15](#) atteste que l'ajout de PEHD réduit la porosité et augmente la densité des briques, ce qui améliore leurs propriétés mécaniques, car les polymères à haute densité contribuent à

réduire les vides à l'intérieur des briques, ce qui améliore la résistance à la compression. Ces additifs contribuent également à renforcer les liens entre les particules d'argile, entraînant donc, une amélioration de la stabilité des briques dans différentes conditions.

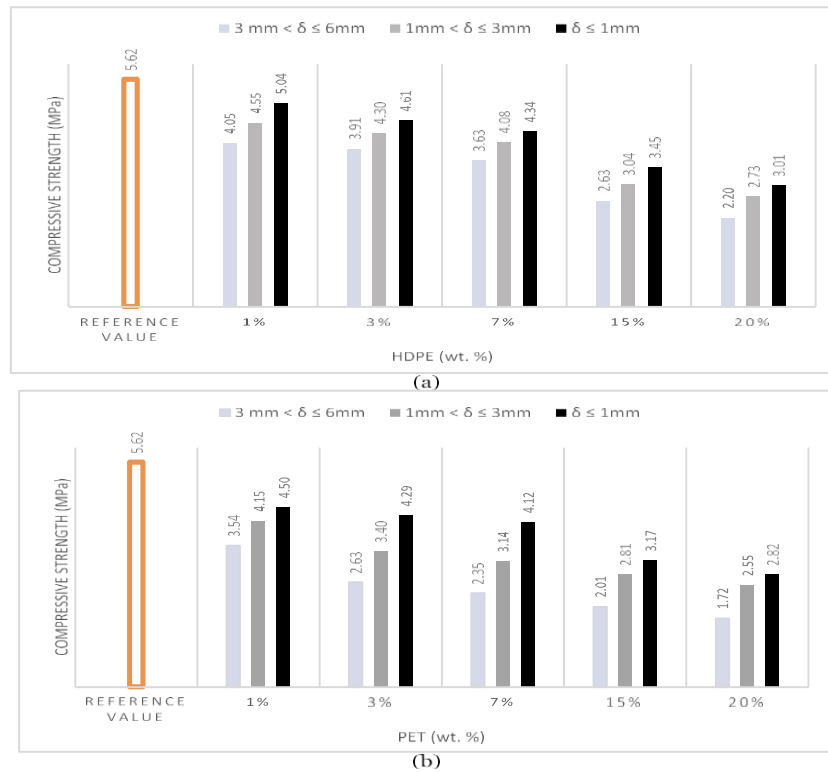


Figure I.15 Résistance à la compression des échantillons de briques avec : a) des additifs PEHD (b) des additifs PET[58]

À la lumière de ces travaux, il apparaît que l'incorporation de déchets tels que les fibres polymères, la poussière de brique et le polyéthylène haute densité (PEHD) contribue de manière significative à l'amélioration des propriétés de résistance à la compression des briques en terre argileuse. Cette intégration se traduit par un renforcement notable de leurs performances mécaniques, conférant ainsi à ces matériaux un caractère plus durable et une robustesse accrue, compatibles avec les exigences de la construction contemporaine.

I.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir le cadre général de la valorisation des déchets dans le domaine de la construction, en mettant en évidence leur potentiel d'intégration dans la fabrication des briques en terre cuite comme alternative durable et respectueuse de l'environnement. Il s'est ouvert par une présentation synthétique de l'usage des briques d'argile de terre à l'échelle mondiale, tout en soulignant les principales limites associées à leurs performances physiques et mécaniques, notamment leur fragilité intrinsèque ainsi que leur faible résistance à l'eau et aux sollicitations mécaniques. Toutefois, plusieurs expérimentations concluantes ont été mises en exergue, attestant de la faisabilité de leur emploi, en particulier dans les contextes locaux et les zones rurales, sous réserve d'une optimisation préalable de leurs propriétés par des procédés de stabilisation et de modification appropriés.

De plus, ce chapitre a abordé la diversité des structures en argile et des techniques de mise en œuvre qui leur sont associées, ainsi que les différents types de sols argileux et leurs caractéristiques fondamentales. Dans cette perspective, les mécanismes de stabilisation des sols ont été classés en trois catégories majeures : stabilisation mécanique, physique et chimique, avec une analyse détaillée des mécanismes d'interaction du ciment et de la chaux, mettant en évidence leur rôle déterminant dans l'amélioration de la structure du sol et le renforcement des propriétés mécaniques des briques obtenues.

Ajoutons qu'une autre partie du chapitre a été consacrée à l'examen critique des travaux et recherches antérieurs portant sur l'incorporation de fibres végétales et de déchets industriels en vue d'améliorer les performances des briques en terre cuite. Ces études ont mis en évidence des résultats particulièrement encourageants, se traduisant par une amélioration de l'isolation thermique, une augmentation de la résistance à la compression et une réduction de la masse volumique. Une attention particulière a été accordée aux rejets ou déchets industriels, en raison de leur abondance et de leurs propriétés physiques susceptibles de contribuer de manière significative à l'amélioration des performances des briques, lorsqu'ils sont incorporés selon des dosages optimisés.

En définitive, ce chapitre a démontré l'intérêt scientifique et technique de la valorisation des déchets dans la production de matériaux de construction, et plus particulièrement dans la fabrication des briques en terre cuite. Il a également mis en évidence la nécessité de mener des études expérimentales locales afin de déterminer les compositions et les proportions les plus adaptées. Cette analyse préliminaire ouvre ainsi la voie au chapitre suivant, consacré à l'étude d'un type spécifique de déchets, à savoir les déchets de masques chirurgicaux, dans le but

d'évaluer la faisabilité de leur valorisation dans les briques en terre cuite à travers une investigation expérimentale approfondie.

CHAPITRE II
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LES DECHETS MEDICAUX

II.1 Introduction

La question de la gestion des déchets reste l'un des défis environnementaux les plus importants auxquels sont actuellement confrontés les pays du monde, en raison de la charge croissante qu'elle impose aux systèmes de gestion urbaine et sanitaire, notamment à la lumière de la croissance rapide de la population et du développement des services médicaux. L'absence de systèmes efficaces de tri, de collecte, de transport et de traitement des déchets, est l'une des principales raisons de la dégradation de l'environnement et de l'aggravation des problèmes de pollution dans divers milieux [74].

Ce point handicapant a pris une nouvelle dimension avec l'émergence de la pandémie de COVID-19, ayant pour conséquence des changements majeurs dans les modèles de consommation de matériel médical à usage unique, en particulier les masques chirurgicaux, les gants et les vêtements de protection. Le monde a connu une augmentation, sans précédent, de la production et de la consommation de ces matériaux ; ce qui, par la suite, a entraîné l'apparition de l'accumulation d'énormes quantités de nouveaux déchets médicaux, qui sont souvent jetés dans la nature sans discernement, en l'absence des systèmes de récupération et de valorisation efficaces [75,76].

Pour cela, le danger de ces déchets réside dans leur composition, vu qu'ils contiennent des microplastiques et ne sont pas biodégradables, ce qui traduit ainsi, un fardeau environnemental récurrent et durable, surtout s'ils ne sont pas intégrés dans une stratégie nationale de recyclage ou de traitement durable bien définie [77]

Face à ces défis, plusieurs pays ont été amenés, parmi lesquels l'Algérie, à revoir leurs systèmes juridiques et réglementaires pour la gestion des déchets médicaux, en préparant de nouvelles réglementations et en mettant à jour les procédures relatives au tri, à la collecte, au transport et au traitement, tout en encourageant les études scientifiques qui visent à développer des solutions locales basées sur les principes de l'économie circulaire [78].

Par conséquent, la question des déchets médicaux n'est plus considérée comme une question secondaire, mais devenue un élément central des politiques environnementales, spécialement à la lumière des crises sanitaires majeures qui ont révélé la fragilité de certains mécanismes de gestion et la nécessité de renforcer les capacités techniques et humaines des institutions concernées. Avec la pandémie de COVID-19, le monde est devenu témoin de la production d'énormes quantités d'équipements de protection à usage unique, en particulier de masques chirurgicaux. Loin d'être uniquement perçus comme un fardeau environnemental, ces

déchets peuvent être envisagés comme des ressources secondaires valorisables, compte tenu de leur composition industrielle. contenant du polypropylène, du matériau plastique caractérisé par sa légèreté, sa résistance à l'humidité et ses propriétés isolantes.

Canaliser ces déchets vers le secteur de la construction en les incorporant à des matériaux tels que le béton, les briques de terre ou l'isolation devient une option prometteuse dans le contexte de l'économie circulaire, car elle contribue à améliorer certaines propriétés techniques des matériaux de construction comme la flexibilité, l'isolation thermique et la légèreté, ainsi l'ont confirmé des études récentes. Cette approche permettra d'obtenir non seulement des avantages environnementaux liés à la réduction du volume des déchets, mais aussi des avantages économiques en récupérant des ressources industrielles qui risquaient d'être perdues si elles étaient éliminées sans être valorisées. Il devient donc nécessaire de déplacer la perspective de la gestion des déchets de l'élimination à l'exploitation, ce qui rend nécessaire le développement de technologies de tri, de traitement et de remodelage et d'encourager la recherche scientifique sur les utilisations possibles de ces déchets dans de nouveaux domaines, en particulier les matériaux de construction durables.

II.2 Définition des déchets

Un déchet ou un rejet est une matière ou un produit qui est jeté ou destiné à être jeté par son propriétaire lorsqu'il n'est plus nécessaire, résultant des cycles de production, de transformation et de consommation. Selon l'article L541-1 du code de l'environnement (article L541-1) [79], « *un déchet est un matériau ou un produit dont on se défait, tel que les déchets de construction et de démolition provenant d'activités de construction et de rénovation* ». Les parties responsables, comme les producteurs de déchets, ont le devoir de les gérer conformément à une hiérarchie de traitement de ces substances résiduelles, qui commence par l'évitement ou la minimisation des déchets, puis la réutilisation ou le recyclage, et enfin l'élimination si les déchets ne peuvent pas être valorisés. Dans le contexte législatif algérien, les déchets sont définis comme des matériaux ou des résidus résultant des processus de production ou de consommation qui ne sont plus nécessaires et qui sont légalement obligés d'être éliminés ou traités. Le cadre juridique algérien classe les déchets en trois catégories principales : Les déchets ménagers, ceux spéciaux (dangereux) et les dits non réactifs. La législation algérienne indique que la gestion des déchets nécessite une approche globale comprenant des processus tels que la collecte, le tri, la valorisation ou, si la valorisation n'est pas possible, l'élimination finale. Il ressort de ces deux définitions que les déchets sont des matières indésirables résultant des activités humaines, qui doivent être traitées conformément

à des cadres législatifs visant à minimiser leur impact sur l'environnement en utilisant diverses méthodes telles que le recyclage ou l'élimination en toute sécurité [80].

II.3 Classification des déchets

Les déchets varient en nature et en composition en fonction de leur source de production, ce qui exige l'adoption d'une classification précise qui facilite la compréhension de leurs caractéristiques et l'identification des méthodes de traitement et de valorisation. L'une des classifications les plus sérieuses est la classification par source, qui est l'une des plus courantes et des plus utilisées dans les études environnementales et industrielles. Nous distinguons les catégories suivantes :

II.3.1 Déchets ménagers

Ces déchets appelés ménagers sont les matériaux qui sont jetés dans la vie de tous les jours à l'intérieur de l'habitation (maison) et qui résultent de diverses activités domestiques [81]. Ces déchets varient entre les matières organiques et inorganiques, et peuvent impliquer des déchets alimentaires : du papier, du plastique, du verre, des métaux, des produits chimiques et des produits de nettoyage, ajoutons que des déchets électroniques et d'autres déchets tels que les vieux meubles et les vêtements inutilisés.

II.3.2 Déchets inertes

Les déchets inactifs ou inertes sont définis comme des matières solides qui ne subissent pas de modifications physiques, chimiques ou biologiques substantielles lorsqu'elles sont stockées. Ils ne se décomposent pas, ne s'enflamment pas et n'interagissent pas avec leur environnement d'une manière qui pourrait nuire à l'espace. Ils se caractérisent par leur faible teneur en polluants et leur faible toxicité pour les organismes vivants, ce qui rend leur impact sur l'environnement très limité [82].



Figure II.1: Les déchets inertes (Sources Internet)

II.3.3 Déchets solides urbains

Les déchets solides municipaux (DSM) désignent généralement tous les déchets produits dans les agglomérations urbaines et gérés par les autorités locales en termes de collecte, de transport et d'élimination finale. Ce type de rejets comprend généralement les déchets alimentaires, les déchets ménagers, les déchets provenant d'activités commerciales et institutionnelles non dangereuses, ainsi que les déchets de nettoyage des rues. Dans certains pays, il est possible d'inclure les déchets de construction et de démolition, et même certains composants qui ne sont généralement pas inclus dans cette classification parmi lesquels, les déchets industriels ou les matières fécales, en particulier dans les pays en voie de développement, où ils sont parfois éliminés avec les déchets municipaux dans les mêmes sites de décharge [83].

II.3.4 Les déchets hospitaliers

Ces déchets médicaux représentent une part relativement faible de l'ensemble des déchets générés par les activités sociétales ; cependant, ils constituent l'un des types de déchets les plus dangereux en raison de leurs incidences potentielles sur l'environnement et la santé. Ils comprennent les matériaux générés par les pratiques de soins de santé, le diagnostic et le traitement, que ce soit dans les hôpitaux, les cliniques ou les laboratoires. [84] Par exemple, la quantité de déchets médicaux produits dans les tunnels a été estimée à 61 343 tonnes en 2002, puis à 117 544 tonnes en 2004, dont 10 943 et 22 326 tonnes, respectivement, ont été classées comme déchets dangereux (Tiba, 2004 ; Tiba, 2006) [85].

Ces rejets sanitaires sont dangereux du fait qu'ils contiennent des substances potentiellement infectieuses ou toxiques, ainsi que des composés plastiques tels que le polychlorure de vinyle (PVC) qui entraînent une pollution de l'environnement lorsqu'ils sont éliminés dans des conditions dangereuses. Historiquement, ces déchets étaient mélangés aux déchets ménagers solides et traités ou mis en décharge à l'aide de méthodes primitives ou dans des incinérateurs non contrôlés, ce qui entraînait une augmentation des émissions toxiques dans l'air. Les défis actuels dans ce domaine sont les suivants : La réduction de la production de ces déchets, la promotion du recyclage, la réglementation des émissions des incinérateurs et la recherche d'alternatives de traitement plus sûres et plus efficaces (Tiba, 2004 ; Tiba, 2006) [85,86]



Figure II.2 Équipement de protection individuelle : Masque facial, masque N95, écran facial, lunettes de protection, gants en latex, gants en nitrile, gants longs en nitrile, blouse de médecin, blouse médicale. (Sources Internet)

A cet égard, les centres pour le contrôle et la prévention des maladies (CDC) précisent que les équipements de protection individuelle utilisés dans les établissements de santé comprennent une large gamme de dispositifs, tels que les masques chirurgicaux ou masques faciaux, les appareils respiratoires, les visières, les lunettes de protection, les gants en nitrile ou en latex, les blouses médicales, les tabliers, les coiffes et les couvre-chaussures. La **figure II.2** illustre les types les plus courants de ces équipements, tandis que le **tableau II.1** présente les matières premières entrant dans leur fabrication. Selon les données de ce tableau, il paraît que la grande majorité des équipements de protection individuelle sont essentiellement constitués de matériaux plastiques, notamment les masques en polypropylène, les blouses en polypropylène et les gants en nitrile. Il convient de souligner que la présente étude se concentrera exclusivement sur les équipements de protection individuelle à usage médical.

Tableau II.1 Matières premières des équipements de protection individuelle

Équipements de protection	Matières premières
Masque facial	Polypropylène, polystyrène, polyéthylène, polyester, chlorure de polyvinyle, téréphtalate de polyéthylène [87]
Écran facial	PLA, ABS, PET [88]
Blouse médicale	Polypropylène, polyéthylène [89]
Gant	Nitrile (de préférence), latex, polychloroprène, PVC, poly isoprène [90]
Lunettes de protection	PVC [90]

Dans le prolongement de ce phénomène, la consommation de plastiques associés aux équipements médicaux dans les établissements de santé a connu une croissance considérable à la suite de la pandémie de COVID-19 [17,19]. Les analyses indiquent que les déchets biomédicaux sont 25 fois plus nombreux qu'avant la pandémie [91, 92]. Afin de prévenir la contamination et de maintenir le niveau d'hygiène requis, la plupart de ces équipements sont conçus pour être jetables et éliminés après chaque utilisation. Cette pratique garantit que le personnel de santé dispose d'un équipement propre et non contaminé à chaque interaction avec les patients, minimisant ainsi la propagation potentielle d'agents infectieux et garantissant un environnement sûr au sein des établissements de santé. Toutefois, cette pratique entraîne également la production d'énormes quantités de déchets médicaux. De même, la consommation quotidienne de masques à usage unique par la population générale contribue de manière significative à la production de déchets plastiques non recyclables, ce qui aura un impact négatif sur l'environnement. Le [tableau II.2](#) présente le taux d'adoption des EPI par population, les niveaux d'utilisation et la quantité estimée de déchets médicaux générés. Le taux d'adoption indiqué dans le tableau représente la proportion de la population qui utilise l'EPI en question :

Tableau II.2: Estimation de la production totale de déchets plastiques due à COVID-19 par région, mesurée en tonnes [90]

Région	Population	Taux d'acceptation des masques par la population (%)	Masque moyen /personne/jour	Masque facial quotidien à usage unique	Estimation des déchets plastiques générés par jour (tonnes)	Estimation des déchets plastiques générés (tonnes)
Afrique	1, 340, 598,147	70	1	411, 814,854	275,465	100, 544,861
Asie	4, 641, 054,775	80	1	1, 875, 181,681	953,641	348, 079,108
Europe	747, 636,026	80	1	445, 022,934	153,623	56, 072,702
Amérique du Sud	653, 952,454	75	1	380, 414,703	134,373	49, 046,434
Amérique du Nord	368, 869,647	80	1	244, 335,150	75,795	27, 665,223
Océanie	42, 677,813	75	1	21, 682,379	8,769	3, 200,836
Total	7794, 788,862			3, 378, 451,702	1, 601,666	584, 609,165

II.3.4.1 Classification des déchets des soins de santé

En général, les déchets de soins de santé sont classés en deux catégories principales :

- **Les déchets non dangereux (75-90 %) :** Ils sont similaires aux déchets ménagers et comprennent les déchets provenant des activités administratives, de cuisine et de nettoyage dans les établissements de santé. [93]
- **Les déchets dangereux (10-25 %) :** Ils représentent une menace importante pour la santé et l'environnement. Pendant la pandémie de COVID-19, la composition des déchets de soins de santé est restée similaire à celle des activités habituelles, à l'exception d'une augmentation spectaculaire des déchets plastiques et microplastiques. La pandémie a doublé la quantité de déchets produits, ce qui souligne l'importance de connaître leur composition pour assurer qu'ils peuvent être recyclés et gérés de manière durable. [93]

II.3.4.1.1 Déchets de soins de santé dangereux

Ceux-ci comprennent plusieurs types de déchets qui diffèrent par leur nature et les risques qu'ils présentent. Les déchets chimiques représentent environ 3 % du total des déchets de soins de santé et comprennent les réactifs, les désinfectants et les solvants. Leur mauvaise gestion peut entraîner de graves dommages pour la santé et l'environnement [94]. Les déchets infectieux, tels que les matériaux contaminés par le sang, sont considérés comme l'un des types de déchets les plus dangereux en raison de leur potentiel de transmission de maladies. Les déchets pathologiques, générés à partir de tissus humains ou animaux, sont également considérés comme des sous-produits indésirables à haut risque en raison de leur potentiel à contenir des virus infectieux [93]. Les déchets radioactifs de ceux de la médecine nucléaire sont très dangereux s'ils ne sont pas gérés avec soin [93]. Les déchets tranchants, tels que les aiguilles et les scalpels, constituent également un risque direct pour les employés de la santé, car ils sont susceptibles de transmettre des infections par des piqûres ou des coupures. Enfin, les déchets pharmaceutiques, comme les médicaments périmés, ont augmenté au cours de la pandémie de COVID-19 et nécessitent un traitement spécial pour minimiser leurs effets toxiques et potentiellement nocifs sur l'environnement et la santé [93].

II.3.4.1.2 Déchets sanitaires non dangereux

Les déchets sanitaires non dangereux comprennent des articles tels que les bouteilles d'eau en plastique, le papier de bureau, les magazines, les journaux, les déchets alimentaires et les emballages alimentaires, à condition qu'ils ne soient pas mélangés à des déchets dangereux [95,96]. Ces derniers sont similaires aux déchets ménagers et peuvent être recyclés dans le cadre

d'une gestion durable des déchets. Cependant, les patients atteints de COVID-19, avec ou sans symptômes, peuvent générer de grandes quantités de déchets apparemment non dangereux mais contaminés par COVID-19, ce qui pourrait présenter un risque important de transmission au sein de la communauté.

II.3.4.2 Techniques d'exploitation des déchets médicaux

Trois méthodes principales sont actuellement utilisées pour traiter les déchets médicaux : L'incinération, le traitement chimique et le traitement physique. Le traitement thermochimique, en particulier la pyrolyse, est l'une des méthodes les plus prometteuses [97,98].

La pyrolyse consiste à chauffer les matières organiques contenues dans les déchets médicaux dans un environnement sans oxygène, à les décomposer et à les convertir en matières économiquement intéressantes parmi lesquelles les combustibles liquides et gazeux et le charbon de bois. Cette technologie est respectueuse de l'environnement, plus efficace en termes de performances, a un coût d'exploitation inférieur à celui des autres méthodes de traitement, minimise l'utilisation de grandes zones de décharge et réduit les émissions polluantes. Les déchets médicaux issus contiennent en grande partie des matières plastiques telles que le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyéthylène téréphtalate et le nylon qui peuvent être efficacement transformées grâce à cette technologie en sources d'énergie utilisables ; à titre d'exemple, le pétrole, le gaz et le charbon [99,100].

II.3.4.3 Déchets d'équipements de protection individuelle- Masque chirurgical

Les masques médicaux, en spécial les masques chirurgicaux, sont l'une des principales mesures de protection individuelle adoptées par les autorités sanitaires mondiales lors de la pandémie de COVID-19 pour limiter la propagation du virus SARS-CoV-2. Des organisations internationales telles que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et les Centres de contrôle des maladies (CDC) ont recommandé l'utilisation de masques par les professionnels de la santé, et ils sont devenus obligatoires dans de nombreux lieux publics en Asie. Cette tendance mondiale a entraîné une augmentation sans précédent de la consommation de masques. Selon les estimations des chercheurs de 49 pays asiatiques, le nombre de masques utilisés quotidiennement a atteint près de 2,2 milliards, la Chine enregistrant à elle seule une consommation quotidienne de plus de 989 millions de masques, suivie par l'Inde avec plus de 381 millions de masques. Un modèle mathématique a été utilisé pour estimer cette utilisation, en fonction de la population, du taux d'urbanisation et de l'acceptation par le public de l'utilisation des masques [77].



Figure II.3 Masques chirurgicaux [101].

Cependant, malgré leur rôle protecteur vital, ces masques ont posé un sérieux problème environnemental en raison de leur composition plastique, qui est basée sur des matériaux non biodégradables tels que le polypropylène. Classés parmi les déchets médicaux infectieux, en particulier lorsqu'ils sont utilisés par des personnes infectées ou dans des environnements hygiéniques, les masques constituent une source potentielle d'infection et un risque de pollution plastique à long terme, spécifiquement par la libération de fibres micro plastiques. Pour réduire les risques sanitaires et environnementaux liés aux masques usagés, les autorités compétentes ont recommandé de les collecter dans des sacs bicolores (rouges ou jaunes), de les stériliser avec des solutions de chlore à 0,5 %, en vue de leur incinération dans des incinérateurs spécialisés à des températures comprises entre 850 et 1100 °C, [75], ou de les traiter à la vapeur d'eau sous pression (autoclave) si les capacités techniques d'incinération ne sont pas disponibles. Toutefois, de nombreux pays en développement ont rencontré des difficultés pour mettre en œuvre ces mesures en raison de l'insuffisance des infrastructures de gestion des déchets médicaux. Il est donc nécessaire de réfléchir à des moyens alternatifs et durables de valoriser les masques usagés, que ce soit en les recyclant ou en les intégrant dans les matériaux de construction comme substitut partiel aux matériaux traditionnels, ce qui ouvre de nouveaux horizons à la recherche scientifique et aux pratiques environnementales durables.

II.3.4.3.1 Types de masques

Les masques sont classés en trois catégories principales selon leur fonction et le niveau de protection qu'ils offrent : Les masques filtrants, les masques médicaux (chirurgicaux) et les masques en tissu (non médicaux). Ces types diffèrent en termes de construction, de capacité de filtration et d'environnement d'utilisation approprié.

➤ **Masques respiratoires filtrants :**

Il s'agit de masques respiratoires conçus pour protéger le porteur contre l'inhalation de particules fines et de polluants en suspension dans l'air. Ils sont généralement utilisés dans les environnements à haut risque. Les types les plus populaires sont N95 et P100, et sont classés selon des normes telles que la norme européenne EN 149 (qui comprend FFP1, FFP2, FFP3 en fonction du pourcentage de fuite interne) et la norme américaine NIOSH (qui comprend N95, N99, R95, P100 et autres).

Les chiffres se réfèrent à l'efficacité de filtration des particules de 0,3 micromètre et les lettres N, R et P se réfèrent à la résistance à l'huile du masque. Ces masques sont disponibles en deux types : Demi-masque (couvrant le nez et la bouche) et masque complet (couvrant tout le visage) [102].

➤ **Masques médicaux/chirurgicaux :**

Utilisés pour protéger le porteur et les autres personnes contre la transmission d'aérosols et de sécrétions en milieu médical, en particulier dans les salles d'opération et les établissements de santé. Ils couvrent le nez, la bouche et le menton et forment une barrière physique contre les grosses particules, mais n'offrent pas de protection efficace contre les fines particules en suspension dans l'air et ne sont pas recommandés pour les procédures qui génèrent des aérosols [103,104].

➤ **Masques en tissu (non médicaux) :**

Également connus sous le nom de masques communautaires, ils sont fabriqués à partir de tissus tels que le coton ou le polyester et sont utilisés par des personnes non infectées dans des lieux publics ou à faible risque. Leur efficacité varie en fonction du type de tissu et du nombre de couches. Ils ne sont pas recommandés dans les environnements médicaux ou pour les travailleurs de la santé, en raison de leur capacité de filtration limitée et de l'absence de normes de performance rigoureuses [102].

II.3.4.3.2 Les effets négatifs des masques sur l'environnement

Les masques, notamment ceux en polypropylène : les masques chirurgicaux et les masques N95, sont une source croissante de pollution environnementale en raison de leurs déchets plastiques non biodégradables. L'élimination inappropriée de ces masques après usage a entraîné leur accumulation dans les rues et les décharges, et leur fuite dans les cours d'eau et les mers, aggravant ainsi la pollution de l'environnement. En outre, la fabrication et le transport des masques contribuent à l'émission d'importantes quantités de gaz à effet de serre, un masque

produisant entre 50 et 60 grammes d'équivalent dioxyde de carbone, ce qui alourdit l'empreinte carbone mondiale. Le traitement de ces déchets, en particulier dans les établissements de santé, nécessite des techniques avancées telles que l'incinération à haute température (900-1200°C), qui, si elle n'est pas effectuée correctement, peut entraîner la libération de substances toxiques telles que les dioxines et les furannes. Non seulement il y a un risque de pollution, mais parce que les effets s'étendront à la faune, avec des cas d'animaux marins et terrestres qui meurent après s'être empêtrés dans les masques ou les avoir ingérés. Exposés aux intempéries et à la lumière, les masques se décomposent en microplastiques qui entrent dans la chaîne alimentaire, provoquant l'accumulation de toxines dans les organismes vivants, ce qui a des répercussions considérables sur la santé et l'environnement. Ces dommages environnementaux se répercutent en fin de compte sur l'économie et la société en ayant un impact négatif sur des secteurs vitaux tels que la pêche, le tourisme et la santé publique [105]



Figure II.4: Menaces pour la vie aquatique dues à l'utilisation de masques faciaux [105]

II.3.4.3.3 Défis actuels en matière de gestion des déchets des masques

L'usage massif d'équipements médicaux jetables, tels que les masques chirurgicaux, au cours de la pandémie de COVID-19 a entraîné une augmentation sans précédent des déchets médicaux, exacerbant la crise de la gestion des déchets, en particulier dans les pays en développement dotés d'infrastructures limitées. Par exemple, en Chine, la production de déchets médicaux est passée de 40 à 240 tonnes par jour, tandis que l'Inde n'était pas en mesure de traiter 600 tonnes par jour avant même la pandémie.

Cette crise a mis en évidence les limites des méthodes de traitement traditionnelles, telles que l'incinération et le traitement chimique, en raison de leur coût élevé et des dommages causés

à l'environnement. Dans ce contexte, la valorisation de ces déchets dans le secteur de la construction apparaît comme une solution alternative prometteuse, d'autant plus que les masques contiennent des fibres de polypropylène, qui peuvent être réutilisées dans la fabrication de matériaux de construction comme le mortier, le béton ou les briques d'argile. Des études récentes indiquent que l'incorporation de ces déchets peut améliorer certaines des propriétés techniques des matériaux, à titre d'exemple, la résistance à la compression et l'isolation, et réduire la consommation de ressources naturelles. Malgré certains problèmes de stérilisation et de sécurité, il serait question d'une option environnementale et économique durable qui mérite de plus amples recherches et développements.

II.3.4.3.4 Valorisation des déchets de masques dans le domaine de la construction

L'utilisation généralisée de masques durant la pandémie de COVID-19 a généré d'énormes quantités de déchets médicaux de nature plastique, soulevant des préoccupations croissantes en matière d'environnement et de santé en raison de la difficulté de la dégradation et des risques d'une élimination inadéquate. Face à ce défi, de nombreuses études ont été orientées vers la recherche de solutions alternatives basées sur la valorisation des déchets de masques, en les réutilisant dans des applications utiles, en particulier dans le domaine des matériaux de construction, qui se caractérise par sa capacité à absorber de grandes quantités de matériaux recyclés sans compromettre la qualité du produit final.

Les résultats de ces études ont montré que l'incorporation de composants de masques faciaux, après stérilisation et traitement, peut améliorer les propriétés mécaniques ou thermiques de matériaux de construction tels que le béton, les briques de terre ou les matériaux d'isolation, tout en réduisant l'impact environnemental associé à l'utilisation de matières premières traditionnelles.

Le [tableau II.3](#) présente un ensemble d'études récentes qui ont abordé cette thématique, en soulignant les matériaux utilisés, la méthode de valorisation et les résultats les plus importants.

Tableau II.3 Aperçu de la recherche sur les additifs des déchets de masques médicaux dans les matériaux de construction

Ré	Pourcentage	Forme	Technique	Remplacement	Résultats
[106]	0.0, 0.125, 0.25 0.375, 0.5, 0.75	Fibre	Pavé	Volume total	Diminution de la (Rc) Augmentation (Aeau)
[107]	1, 1.5, 2 et 0.75, 1, 1.5	Fibre Carrés	Béton	Volume total	Augmentation CS 18.28 % Augmentation FS 14.57%
[108]	0, 1, 2, 3, 5	Rectangle Carrés	Béton	Volume sable	Max CS 37.08 Max FS 1.82

[109]	0.5, 1,2.7, 5	Fibre	Béton	Volume ciment	Diminution de la (Rc)
[110]	0.125,0.25, 0.375,0.5,0.75	Fibre	Béton	Volume total	Diminution de la (Rc)
[111]	0.5, 1,1.5, 2	Fibre	Béton	Volume ciment	Augmentation CS 17% Augmentation FS 26%
[02]	0.5, 1,1.5, 2	Fibre	Béton	Volume total	Augmentation CS 17.1% Augmentation FS 23.3%
[112]	0.5,1,1.5,2,2.5	Fibre	Béton	Volume total	Augmentation CS 13.68% Augmentation FS 33.4%
[113]	1,2	Fibre	Béton	Volume total	Augmentation CS 54% Augmentation FS 42.25%
[114]	0.1,0.15,0.20, 0.25	Fibre	Béton	Volume total	Diminution de la (Rc) Augmentation FS 34.8%
[115]	0.1,0.2	Fibre	Béton	Volume total	Augmentation CS 12.1% Augmentation FS 59.5%
[116]	1.4,2	Fibre	Béton	Volume total	Diminution de la (Rc) Diminution de la (FS)
[117]	0,2	Fibre	Béton	Volume total	Augmentation CS 5%
[118]	0,0.5,1,1.5,2	Fibre	Béton	Volume total	Diminution de la (Rc) Augmentation FS 17.0%
[119]	0.3,0.5,0.8,1	Fibre	Béton	Poids ciment	Augmentation CS 6.72% Augmentation FS 26%
[120]	0.15,0.2,0.25 ,0.3	Fibre	Béton	Volume total	Augmentation CS 6.72% Augmentation FS 59.5%
[121]	0.1,0.15,0.20, 0.25	Fibre	Béton	Volume total	Augmentation CS 17.06% Augmentation FS 10.90%
[122]	0.3,0.6,0.9,1.2	Laine	L'argile grasse	Volume total	Diminution de la (Rc)
[123]	1,2,3 et 4	Laine	Bricks	Volume total	Augmentation CS 0.17% Augmentation FS 40.87%
[124]	0,1,2,3 et 4	Laine	Briques	Volume total	Augmentation CS 22.10% Augmentation FS 54.00%
[125]	0.1 ,0.2 ,0.3, 0.5	Fibre	Mortier de ciment	Volume total	Augmentation CS 22.10% Augmentation FS 54.00%
[126]	0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1	Fibre	Argiles expansives	Poids total	Augmentation CS 225%

*CS : Résistance à la compression

*FS : Résistance à la traction

*Aeau : Absorption d'eau

II.3.4.3.5 Utilisation de déchets de masques médicaux dans le béton

La période post-pandémique de la COVID-19 a suscité un intérêt croissant dans le monde universitaire pour la valorisation potentielle des déchets de masques chirurgicaux jetables dans les matériaux de construction, en particulier le mortier de ciment. Siva Avudaiappan [111] ont

proposé d'utiliser des fibres de polypropylène dérivées de masques comme additif au mélange de mortier, après traitement mécanique par déchiquetage en fibres courtes dans des proportions volumétriques allant de 0,5 % à 2 %. Une série de mélanges (MF0 à MF4) ont été préparés dans lesquels ces fibres ont été incorporées dans un mortier de ciment avec un rapport sable/ciment de 2 :1, tout en maintenant un rapport eau/ciment constant. Les résultats ont montré une amélioration significative des propriétés mécaniques à 1%, où la résistance à la compression a augmenté jusqu'à 17%, également la résistance à la traction a augmenté d'environ 22% à 1,5% par rapport au mélange de références (**Figure II.5**). On a également constaté une augmentation du taux d'absorption avec l'augmentation de la teneur en fibres, ce qui est attribué à la nature poreuse des fibres ajoutées (**figure II.6**). L'étude a montré que l'incorporation de masques recyclés non seulement améliore les propriétés du mortier de ciment, mais représente également une voie prometteuse pour la valorisation des déchets médicaux dans le cadre de l'économie circulaire.

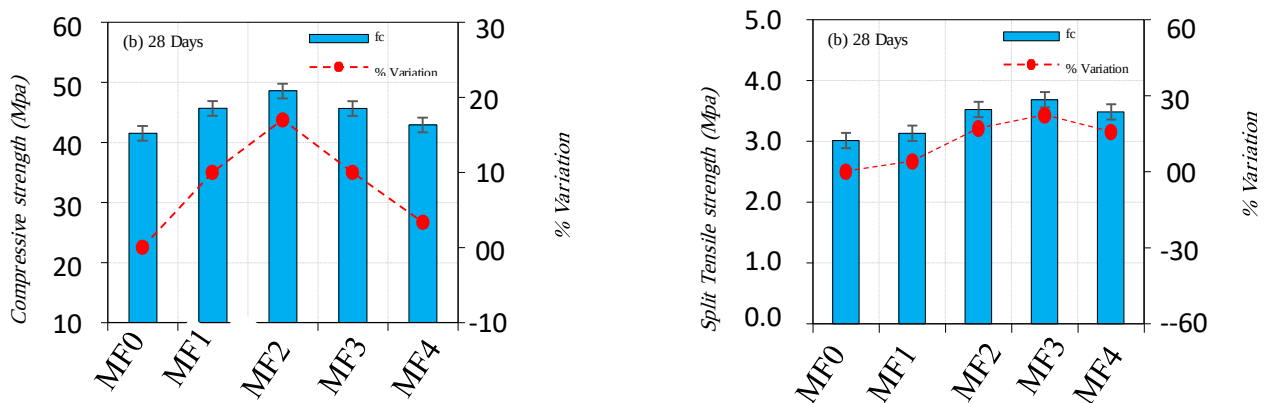


Figure II. 5 Résistance à la compression et traction 28 jours [111] .

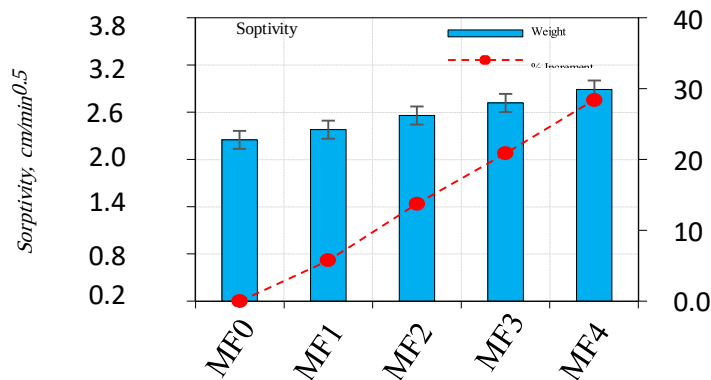


Figure II. 6: Résultats des tests d'absorption d'eau [111]

Dans une autre étude menée par Ilyas et ses collègues [02] sur la possibilité de réutiliser des masques chirurgicaux à trois couches comme additif pour améliorer les performances du béton, les masques usagés ont été traités en les stérilisant à la vapeur ou par pulvérisation d'alcool après les avoir laissés pendant sept jours, puis transformés en deux formes différentes : des fibres grossières irrégulières à l'aide d'une machine à carder le coton et de petits fragments carrés (1,5-2 mm) à l'aide d'une déchiqueteuse de papier. Ces fibres ou fragments carrés ont été incorporés au béton dans des proportions volumétriques allant de 0,5 % à 2 % du volume de béton. Les résultats ont montré que l'incorporation d'un renfort en fibres de 1 % a entraîné une amélioration significative des propriétés mécaniques avec une augmentation de 17,9 % de la résistance à la compression et de 23,3 % de la résistance à la traction par rapport à l'éprouvette de référence (**figure II.7**). Les pièces carrées ont montré une légère amélioration de la résistance à la compression de 8,3 % mais ont eu un effet négatif sur la résistance à la traction (**figure.II.7**).

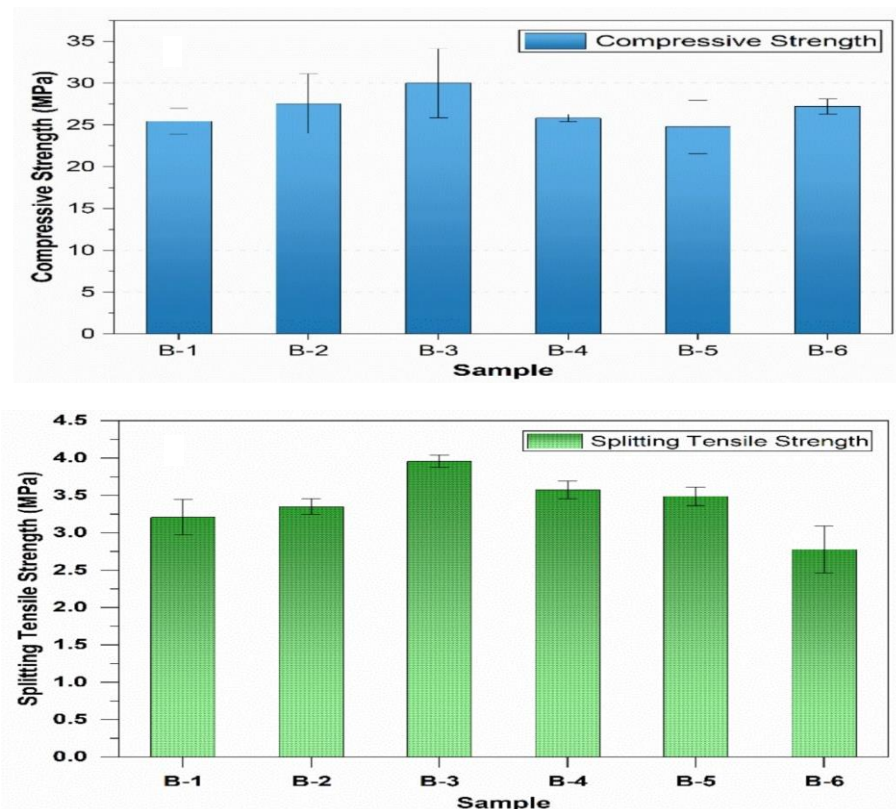


Figure II. 7. (a) Résistance à la compression et(b) et à la traction [02] .

De même, Diana Ningrum et ses collègues [120] ont mené une étude sur l'effet du recyclage des masques médicaux mis au rebut sur les propriétés mécaniques du béton à hautes performances, dans laquelle ils ont utilisé des fibres provenant de masques chirurgicaux mis au rebut, de différentes tailles et dans des proportions volumétriques allant de 0 % à 0,30 % du

volume du béton. Les résultats de la résistance à la compression et à la traction après 28 jours de durcissement ont montré que l'ajout de 0,15 % de fibres de 2 x 0,5 cm améliorait la résistance à la compression à 72,37 MPa, contre 66,3 MPa pour le mélange de référence ([figure II.8](#)). La résistance à la traction a augmenté à 7,29 MPa dans les échantillons contenant 20 % de fibres de 5 x 0,5 cm, contre 4,92 MPa dans le béton sans fibres, comme le montrent les [figures II.9](#). Cette amélioration est attribuée à la capacité des fibres à réduire la propagation des microfissures et à améliorer la cohésion interne du mélange de béton.

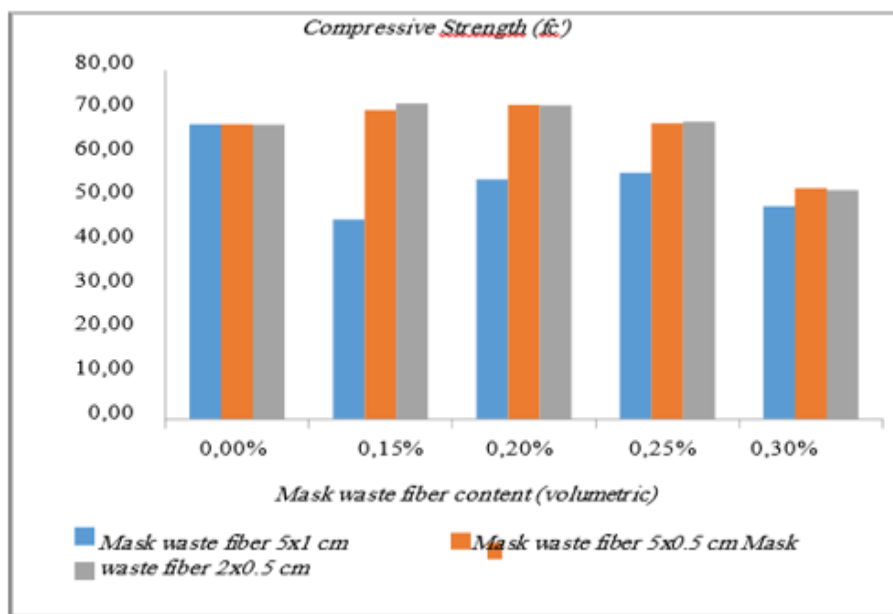


Figure II.8. Résistance à la compression [120].

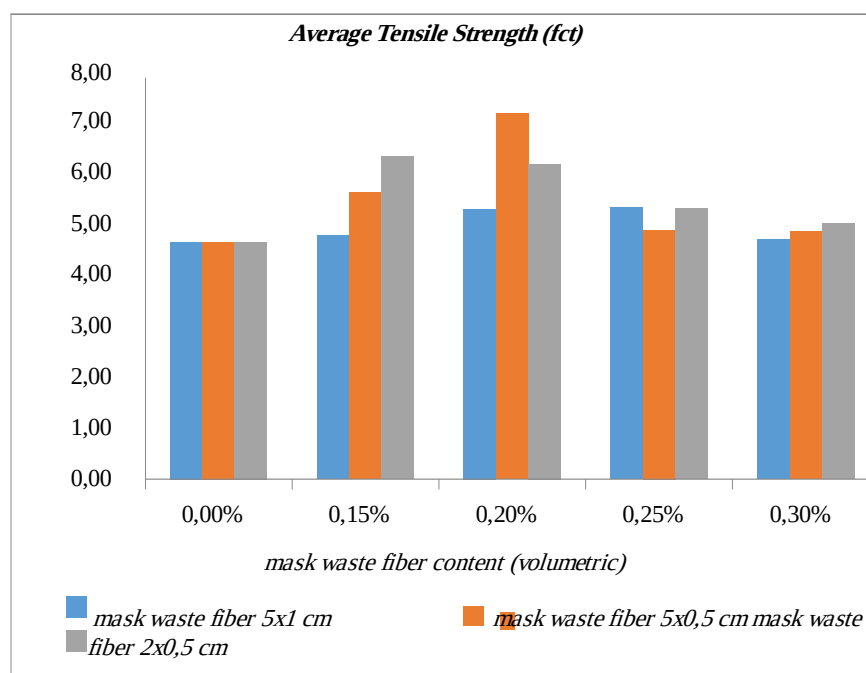


Figure II.9. Résistance à la traction [120] .

Ajam et al [111] ont étudié la possibilité de valoriser les déchets de masques chirurgicaux à usage unique en les introduisant sous forme de petits morceaux (2 et 4 cm²) dans différentes proportions (1% à 5%) du volume de sable dans la composition du mortier de ciment comme indiqué dans le [tableau II.4](#). L'étude visait à évaluer l'effet de cet ajout sur les propriétés mécaniques, physiques et hydrauliques du matériau. Les résultats ont montré que l'inclusion de sacs améliorait les résistances à la compression et à la flexion, en particulier à faible proportion, avec une augmentation de 20 % de la résistance à la compression et de 30 % de la résistance à la flexion pour les échantillons contenant 1 % de sacs surdimensionnés ([figure II.10](#)).

Tableau II.4 Composition du mortier (kg/m³) [108].

Formulation	Sand	Fiber	Cement	Water
M ₀	1450	0	450	225
M ₁	1435	1.63	450	225
M ₂	1419	3.26	450	225
M ₃	1406.5	4.89	450	225
M ₅	1373	8.15	450	225

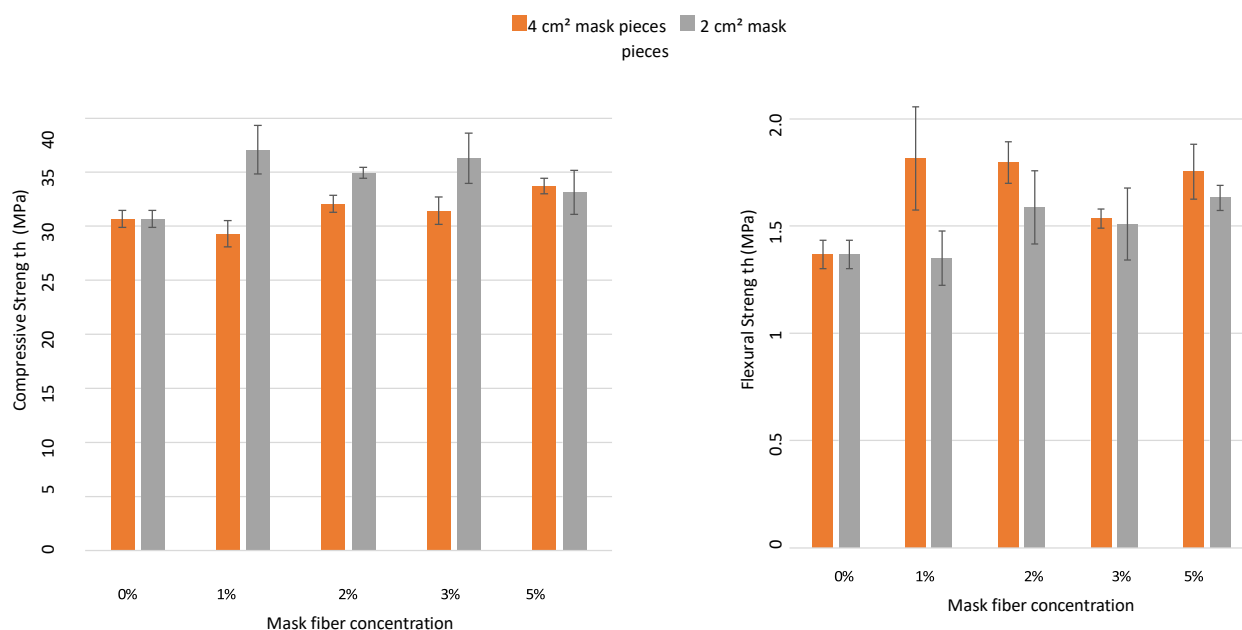


Figure II.10 (a) Résistance à la compression (b) Résistance à la traction à 28 jours [108]

Cet ajout a également amélioré l'isolation thermique et acoustique, puisque le coefficient de conductivité thermique a diminué jusqu'à 23 % ([figure II.11](#)) et que le coefficient d'absorption acoustique a augmenté de manière significative, surtout aux fréquences moyennes.

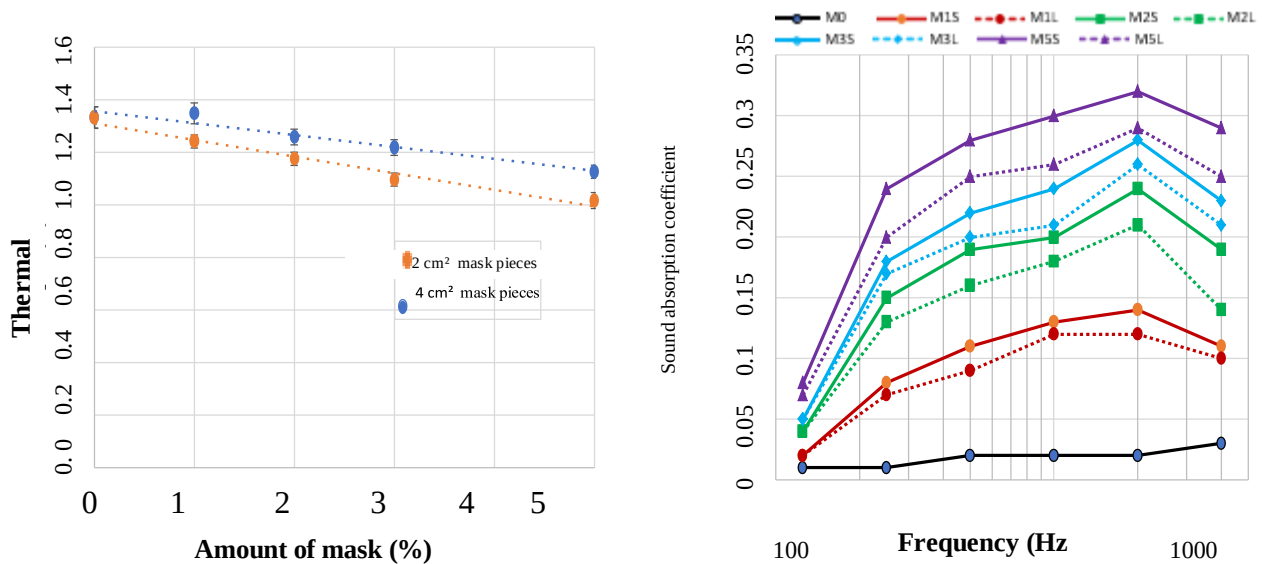


Figure II.11 Conductivité thermique [108]

Néanmoins, une augmentation du taux d'absorption capillaire de l'eau a été observée, en particulier à des ratios plus élevés ([figure II.12](#)). Les chercheurs ont conclu que la réutilisation des masques chirurgicaux dans les matériaux de construction est une option environnementale efficace qui contribue à réduire la pollution et offre des alternatives peu coûteuses pour améliorer les performances du mortier de ciment.

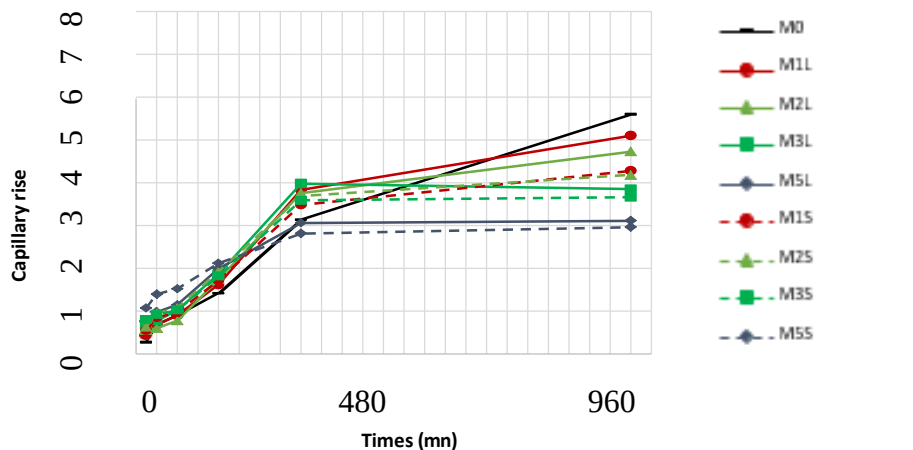


Figure II.12. Montée capillaire dans les échantillons [108]

II.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté une vue d'ensemble du problème mondial des déchets et du défi environnemental et économique croissant qu'il pose, en mettant l'accent sur les déchets médicaux en tant que type spécial de déchets dont la composition et les méthodes de traitement sont complexes. L'augmentation significative du volume des déchets médicaux, en particulier après la pandémie de COVID-19, et l'utilisation généralisée de masques chirurgicaux jetables, qui a accru la pression sur les systèmes de gestion des déchets, ont été mises en évidence.

Les principales méthodes actuellement utilisées pour éliminer les déchets médicaux, telles que l'incinération, la stérilisation à la vapeur et l'enfouissement, ont également été discutées, soulignant les limites de ces méthodes et leur impact négatif sur l'environnement et la santé humaine, notamment en termes d'émissions de dioxines et de microplastiques. Cela a incité de nombreux chercheurs à rechercher des alternatives innovantes et durables en valorisant ces déchets dans le secteur de la construction.

Dans cette perspective, le présent chapitre expose une série d'études sur la valorisation des déchets de masques chirurgicaux dans le béton et le mortier de ciment, où ces déchets ont été utilisés après avoir été coupés en petites fibres ou fractions et incorporés dans des mélanges dans des proportions spécifiques. Les résultats de ces travaux indiquent ce qui suit :

- Le béton renforcé par des fibres à masque facial a montré une amélioration significative de la résistance à la compression, à la fissuration et à la flexion.
- L'incorporation de ces fibres réduit la porosité et augmente la cohésion interne de la pâte de ciment, améliorant ainsi les propriétés de durabilité à long terme.
- L'efficacité de la valorisation dépend de multiples facteurs, dont la taille et la forme des fibres, la proportion de fibres ajoutées et la façon dont elles sont réparties dans le mélange.
- Les évaluations microscopiques et mécaniques ont confirmé que l'introduction de fibres gag n'affecte pas négativement la structure du béton, mais améliore plutôt son homogénéité et sa rigidité.
- Certaines études ont montré une amélioration significative des propriétés thermiques des mélanges, la présence de fibres plastiques réduisant la conductivité thermique, améliorant la capacité d'isolation thermique des matériaux et les rendant plus adaptés à une utilisation dans les climats chauds ou tempérés.
- L'utilisation de ces déchets est une solution prometteuse pour minimiser la pollution plastique due aux chiffons et réaliser le concept d'économie circulaire dans le secteur de la construction.

Sur la base de ces résultats positifs, le présent travail propose de tenter la valorisation des déchets de masques faciaux dans les briques de terre et d'étudier l'effet de leur incorporation sur les propriétés physiques et mécaniques des briques. Cette approche vise à produire un matériau de construction local peu coûteux et plus durable, capable de minimiser l'impact environnemental des déchets médicaux et de contribuer au développement urbain durable.

CHAPITRE III

**TRAITEMENT ET SELECTION DES
SOLS**

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous mettrons en perspective le choix des matériaux utilisés dans la fabrication des blocs de terre crue qui, sans doute, nécessite une compréhension approfondie de leurs propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques. Ces dernières permettent de juger la qualité des blocs de terre en fonction de leur usage prévu. La nature du sol, ainsi que les liants utilisés comme stabilisants, constituent des facteurs essentiels influençant directement le comportement et la performance des blocs de terre.

Ainsi, pour étudier avec précision les caractéristiques des blocs de terre crue, il est indispensable de prendre en compte les propriétés de leurs composants. Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord, les caractéristiques des matériaux de base utilisés, suivies d'un aperçu des formulations adoptées. Une étude d'optimisation y est également intégrée, dans lesquels trois types de sols ont été sélectionnés, et l'effet de l'ajout de deux stabilisants, à savoir le ciment et la chaux a été examiné selon différentes proportions, dans le but d'identifier le sol optimal et le stabilisant le plus adapté à la fabrication des blocs de terre crue. Enfin, la deuxième partie de ce chapitre est consacrée à la description des différentes méthodes expérimentales utilisées pour tester les propriétés mécaniques et la durabilité des blocs de terre crue, suivie d'une discussion sur les résultats obtenus.

III.2 Programme expérimental

III.2.1 Matériaux utilisés

III.2.1.1 Les sols utilisés

Dans le cadre de la présente étude méthodologique, différents types de sols ont été utilisés [Figure III.1](#) et qui ont été collectés dans différentes régions d'Algérie. Le sol A a été obtenu dans la commune d'Oulad Adi, wilaya de **M'Sila**, le sol B à Ouled Akhlouf, wilaya de **Bordj Bou Arreridj**, et le sol C à Ain Oulmene dans la wilaya de **Sétif**. Tous les échantillons ont été prélevés à une profondeur de deux mètres sous la surface du site. Les [tableaux 1](#) et [2](#) présentent la composition chimique et minéralogique des sols étudiés, en utilisant respectivement l'analyse par fluorescence X (FRX) et la diffraction des rayons X (DRX). La [figure III.2](#) montre l'analyse granulométrique des sols testés selon la norme NF EN ISO 17892-4 [127]. Le [Tableau III.2](#) présente l'analyse DRX qui indique que le sol A est riche en calcite avec des traces de sépiolite et de kaolinite, le sol B est caractérisé par du quartz et de la calcite, tandis que le sol C est également riche en quartz et en calcite. Les densités absolues des sols A, B et C sont respectivement de 2385 kg/m³, 2482 kg/m³, et 2423 kg/m³, tandis que les densités apparentes

étaient : 1202 kg/m³, 1254 kg/m³ et 1220 kg/m³. Les limites d'Atterberg des échantillons de sol ont été déterminées conformément à la norme NFP 94-051, comme le montre le [tableau III.3](#).



Figure III.1 Matériaux utilisés dans cette étude

Tableau III.1 Composition chimique des sols étudiés

Composants	Sol A	Sol B	Sol C
SiO ₂	37.35	37.55	47.33
Al ₂ O ₃	3.8	6.2	4.23
Fe ₂ O ₃	2.24	2.97	1.92
CaO	27.41	23.04	22.86
MgO	1.31	4.75	1.71
SO ₃	0.61	1.44	0.14
K ₂ O	0.6	1.47	1.09
Na ₂ O	0.11	0.1	0.05
P ₂ O ₅	0.08	0.24	0.07
TiO ₂	0.25	0.34	0.27
Cr ₂ O ₃	0.008	0.008	0.008
Mn ₂ O ₃	0.02	0.004	0.05
ZnO	0.007	0.005	0.002
SrO	0.091	0.11	0.024
L.O. I	25.58	22	19.97

Tableau III.2 Composition minérale des sols étudiés

Minéraux	Sol A	Sol B	Sol C
Calcite	47.96	37.55	40.36
Dolomite	3.81	10.23	1.14
Sidérite	-	-	0.04
Ankérîte	-	-	0.28
Magnésite	-	-	0.81
Quartz	30.72	23.2	43.57
Pyrite	-	-	0.13
Illite	4.69	20.27	8.62
Kaolinite	4.61	2.06	1.89
Albite	0.32	0.39	0.61
K-Feldspath	-	-	2.55
Chlorite	-	0.35	-
Pyrophyllite	2.17	3.77	-
Microcline	4.19	1.4	-
Diaspore	0.28	0.04	-
Topaze	0.4	0.66	-
Fluorine	0.84	0.07	-

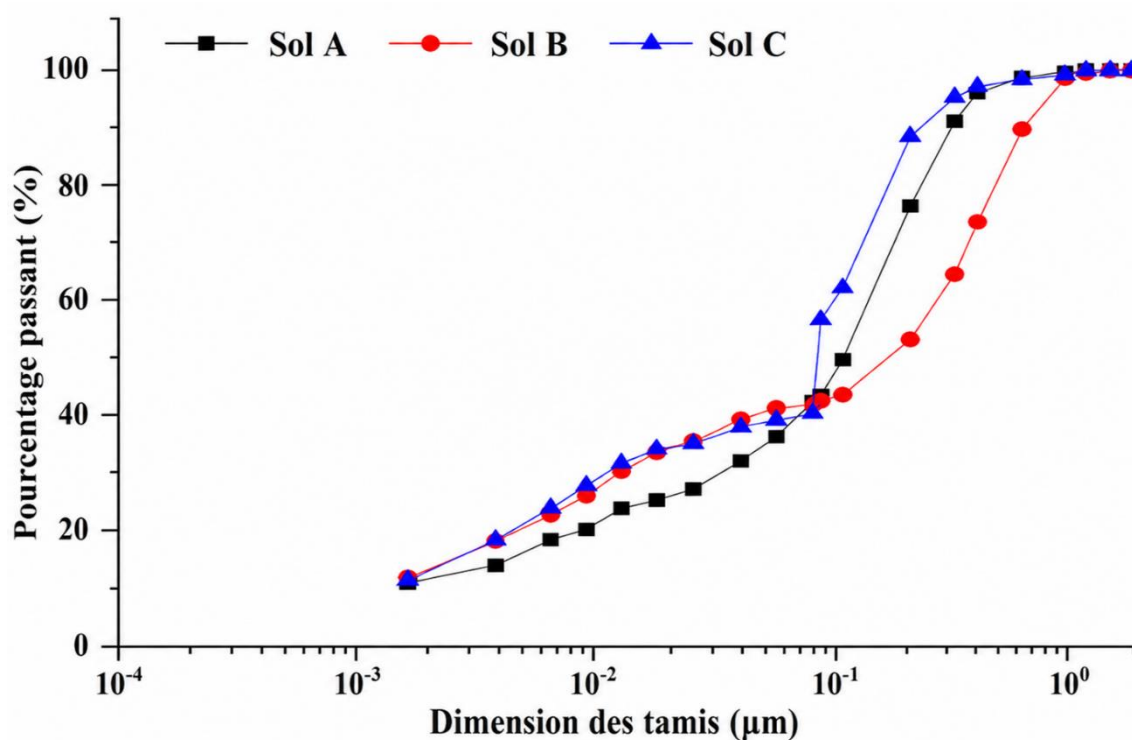


Figure III.2 Distribution granulométrique des sols utilisés



Figure III.3 Essai des limites d'Atterberg

Tableau III.3 Résultats du test de consistance du sol

Limites d'Atterberg (%)	Sol A	Sol B	Sol C
Limite de liquidité (WL)	36.09	25.64	30.28
Limite plastique (WP)	14.5	17.48	14.61
Indice plastique (PI)	21.59	8.16	15.67

III.2.1.2 La chaux

De manière générale, l'ensemble des types de chaux peut être mobilisé dans les procédés de stabilisation des blocs de terre, en vue d'améliorer leur résistance à la compression et de renforcer leur comportement face à l'action de l'eau et de l'humidité. Dans cette étude, nous avons choisi la chaux fabriquée à Saïda et disponible commercialement dans tout le pays algérien. (<https://bmsdcompanies.com>). Ses propriétés chimiques et physiques sont présentées dans le **tableau III.4**.

Tableau III.4 Propriétés chimiques et physiques de la chaux utilisée.

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaCO ₃	Na ₂ O	CO ₂
(%)	2.5	1.5	2	83.3	0.5	0.5	10	0.45	5
Aspect physique			Poudre blanche sèche						
Poids spécifique			2.00						
Particules supérieures à 90 µm (%)			< 10						
Particules de plus de 630 µm (%)			0						
Matière insoluble (%)			1						
Densité apparente (g/l)			600 – 900						

III.2.1.3 Ciment

Dans ce cadre, le ciment Portland (CEM II/B 42,5) a été utilisé. Les propriétés physico-chimiques du ciment utilisé sont indiquées dans le **tableau III 5**. Ce ciment était un améliorant chimique pour le sol étudié.

Tableau III.5 Propriétés physiques et chimiques du ciment.

Composition	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	L.O.I
(%)	27.83	6.21	57.22	3.12	2.02	0.94	0.14	2.41
Temps de réglage		Initiale	2 heures et 50 minutes					
		Finale	4 heures et 60 minutes					
C3A = 11.19 % C4AF = 9.5 % C3S = 56.4 % C2S = 23.2 %		Surface spécifique = 3845 cm²/g Densité = 3150 kg/m3 Expansion du ciment = 1,22 mm						

III.2.1.4 Eau

Ce liquide vital dit eau utilisée dans la présente étude est de l'eau ordinaire de l'Algérienne des Eaux à une température de 20 ± 1°C et qui est conforme à la norme de qualité NFP 18-404.

III.2.2 Préparation des échantillons

Pour chaque type de sol, deux mélanges ont été préparés, l'un avec de l'argile traitée à la chaux et l'autre avec du ciment. L'argile a été stabilisée en utilisant des ratios variables de 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 %. Les sols étudiés ont été tamisés avec un tamis de 2 mm et placés dans un four à 65°C pendant 24 heures pour éliminer l'humidité et assurer un séchage complet [128, 41,42]. Les différents types de sol ont été préparés en variant les proportions du ciment comme mentionné ci-dessus dans la première série d'essais, et en variant la chaux avec les mêmes proportions dans une autre série. Ces pourcentages étaient basés sur le poids total du sol. L'objectif était d'étudier les effets du ciment et de la chaux sur le sol, afin de déterminer quel stabilisant est le plus efficace pour obtenir une stabilité chimique et mécanique, deux facteurs critiques dans la production de brique de terre [129]. Pour la préparation des briques d'argile, on a utilisé de l'eau du robinet propre [130]. La teneur en eau requise (W) pour obtenir une ouvrabilité adéquate du mélange a été calculée à l'aide de l'équation (1) :

$$W (\%) = \frac{(W_L + W_P)}{2} \quad (1)$$

Où W_L et W_P représentent respectivement la limite de liquidité et la limite de plasticité. Les valeurs de teneur en eau obtenues étaient de 25,30 %, 21,56 % et 22,45 % pour les sols A, B et C, respectivement. Cette méthode a été adoptée dans plusieurs études antérieures [128, 41, 42, 131]. Tout d'abord, le sol sec, la chaux sèche ou le ciment ont été mélangés pendant environ 2 minutes. Ensuite, de l'eau a été progressivement ajoutée. Pour les mélanges contenant de la chaux, la quantité d'eau ajoutée correspond à la quantité de chaux utilisée (c'est-à-dire que pour 1 % de chaux ajoutée, 1 % d'eau a été introduite). Pour les mélanges cimentés, une quantité supplémentaire d'eau égale à 45% du ratio de ciment a été ajoutée à la teneur en eau calculée précédemment. Le malaxage a été poursuivi pendant 2 minutes jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène. Les mélanges préparés ont été placés dans des moules de dimensions intérieures de 4×4×16 cm³ et 10×10×10 cm³, puis laissés sécher à l'air libre pendant 72 h [41,42]. Les échantillons ont ensuite été démoulés et scellés dans un film plastique hermétique ([figure III.4](#)). La cure des échantillons contenant de la chaux a été réalisée dans un four à 65 °C pendant 7 jours, selon le protocole adopté dans des études précédentes [42,132]. En outre, les échantillons contenant du ciment ont été séchés pendant 28 jours, conformément à la technique adoptée par Ho et al [133]. La composition des mélanges préparés est illustrée dans le [tableau.6](#).

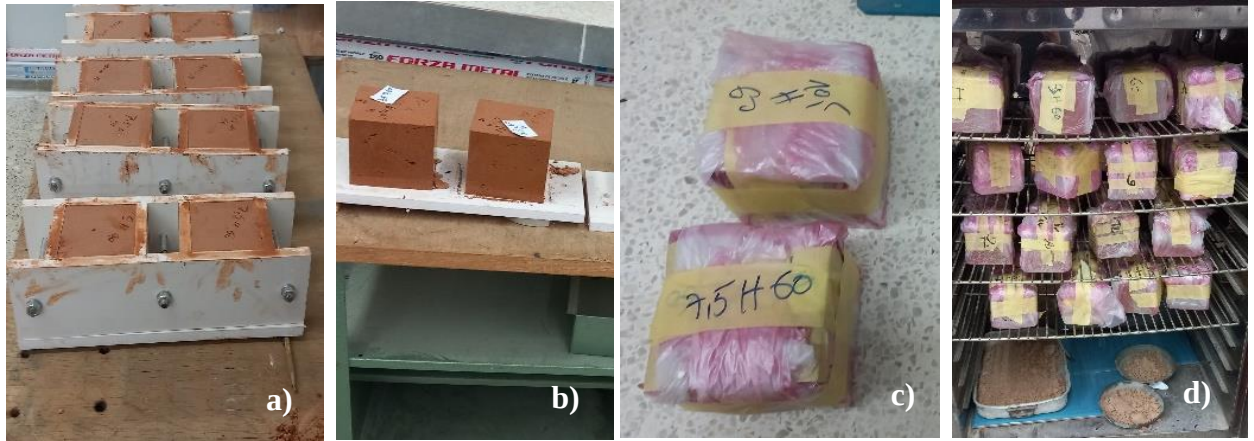


Figure III.4 Préparation des échantillons : a) remplissage des moules, b) démoulage, c) conservation des échantillons dans un film plastique et d) échantillons au four à 65°C.

Tableau III.6 Composition des mélanges

Type de sol	Argile		Chaux		Ciment		L'eau	
	Ratio (%)	Quantité (Kg/m ³)	Ratio (%)	Quantité (Kg/m ³)	Ratio (%)	Quantité (Kg/m ³)	Ratio (%)	Quantité (Kg/m ³)
Sol A	100*	1202	-	-	-	-	25.29	303.99
	98	1177.96	2	24.04	-	-	27.29	328.03
	96	1153.92	4	48.08	-	-	29.29	352.07
	94	1129.88	6	72.12	-	-	31.29	376.11
	92	1105.84	8	96.16	-	-	33.29	400.15
	90	1081.8	10	120.2	-	-	35.29	424.19
	98	1177.96	-	-	2	24.04	26.19	314.8
	96	1153.92	-	-	4	48.08	27.09	325.62
	94	1129.88	-	-	6	72.12	27.99	336.44
	92	1105.84	-	-	8	96.16	28.89	347.26
	90	1081.8	-	-	10	120.2	29.79	358.08
Sol B	100*	1254	-	-	-	-	21.56	270.36
	98	1228.92	2	25.08	-	-	23.56	289.53
	96	1203.84	4	50.16	-	-	25.56	307.7
	94	1178.76	6	75.24	-	-	27.56	324.87
	92	1153.68	8	100.32	-	-	29.56	341.03
	90	1128.6	10	125.4	-	-	31.56	356.19
	98	1228.92	-	-	2	25.08	22.5	276.51
	96	1203.84	-	-	4	50.16	23.44	282.18
	94	1178.76	-	-	6	75.24	24.38	287.38
	92	1153.68	-	-	8	100.32	25.32	292.11
	90	1128.6	-	-	10	125.4	26.25	296.26
Sol C	100*	1220	-	-	-	-	22.45	273.89
	98	1195.6	2	24.4	-	-	24.45	298.29
	96	1171.2	4	48.8	-	-	26.45	322.69
	94	1146.8	6	73.2	-	-	28.45	347.09

	92	1122.4	8	97.6	-	-	30.45	371.49
	90	1098	10	122	-	-	32.45	395.89
	98	1195.6	-	-	2	24.4	23.36	284.99
	96	1171.2	-	-	4	48.8	24.28	296.22
	94	1146.8	-	-	6	73.2	25.19	307.32
	92	1122.4	-	-	8	97.6	26.1	318.42
	90	1098	-	-	10	122	27.02	329.64
* Mélange de référence								

III.2.3 Essais effectués

☞ Pour chaque essai, trois éprouvettes ont été utilisées afin d'assurer la fiabilité et la répétabilité des résultats expérimentaux.

III.2.3.1 Essai de résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression (CS) ont été réalisés sur des éprouvettes de 10×10×10 cm³ à l'aide d'une machine "Incotecnica modèle PA/MPC-2" d'une capacité de 200 kN (**figure III.5**), conformément à la norme EN 12390-3 :2019 [134,135]. La vitesse de chargement a été fixée à 0,5 mm/min conformément aux recommandations de la norme ASTM D2166-06 [136].

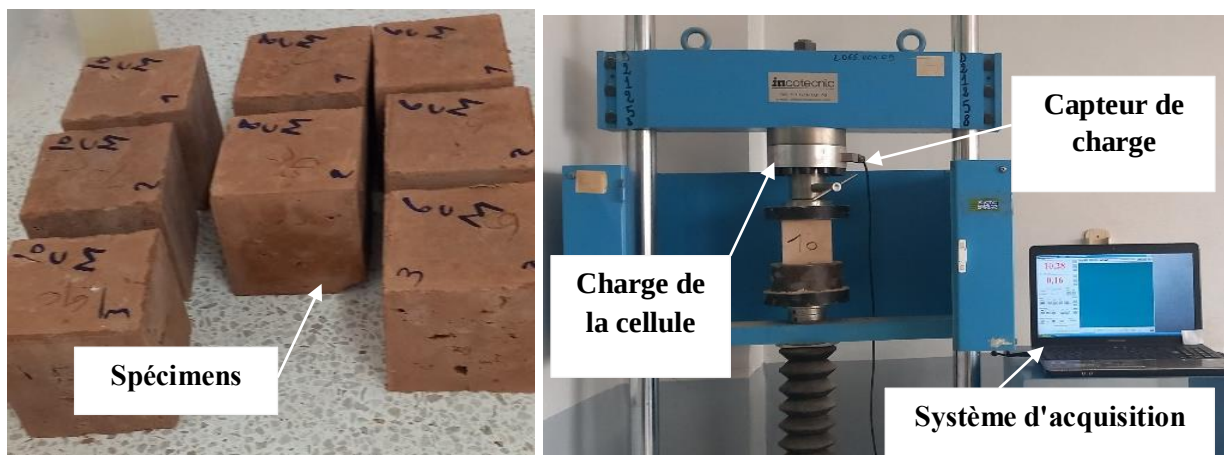


Figure III.5 Essai de résistance à la compression.

III.2.3.2 Essai de résistance à flexion

L'essai à flexion a été réalisé sur des échantillons prismatiques aux dimensions suivantes 4×4×16 cm³, selon la norme NF EN 196-1 [137], comme illustré sur la **figure III.6**. La contrainte de flexion (σ_f) a été calculée à l'aide de l'équation (2) :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (2)$$

Où représente la force maximale ayant provoqué la rupture de l'échantillon, b sa hauteur, h sa largeur, et L sa longueur.



Figure III.6 Essai de résistance à la flexion

III.2.3.3 Absorption totale

L'eau totale absorbée (ATE) par l'argile est cruciale, car elle reflète l'interaction entre l'argile et l'eau, ainsi que sa porosité. Ces caractéristiques ont une influence significative sur la résistance mécanique du matériau. Le test d'absorption d'eau consiste à immerger l'échantillon dans l'eau pendant une durée comprise entre 1 et 4 jours. La variation de masse entre l'état sec de l'échantillon et son état après immersion est mesurée toutes les 24 heures. La quantité d'eau absorbée est ensuite calculée à l'aide de l'équation (3) [41,138] :

$$ATE = \frac{(W_h - W_s)}{W_s} \times 100 \quad (3)$$

W_h et W_s représentent, respectivement, le poids de l'échantillon après élimination de l'eau et son poids sec.

III.2.3.4 Absorption d'eau capillaire

L'absorption capillaire d'eau a été évaluée conformément à la norme XP P13-901 [139]. Pour ce faire, la face inférieure de l'échantillon a été immergée dans 5 mm d'eau pendant 10 minutes. À l'issue de cette période, la variation de masse a été mesurée afin de déterminer la quantité d'eau absorbée. Le coefficient d'absorption capillaire (WA) a ensuite été calculé à l'aide de l'équation (4) :

$$C_b = \frac{(M_1 - M_0)}{S\sqrt{t}} \times 100 \quad (4)$$

Où C_b , M_0 , M_1 , S et T représentent, respectivement, le coefficient de remontée capillaire de l'eau, la masse initiale avant immersion dans l'eau, la masse après immersion, la surface immergée et la durée pendant laquelle l'échantillon est resté dans l'eau.

III.3 Résultats et discussions

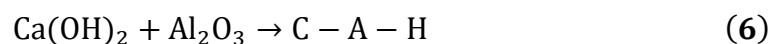
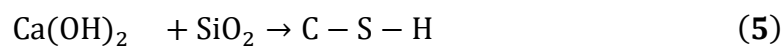
Le comportement des blocs de brique de terre stabilisés, fabriqués à partir de différents types de sol (A, B et C), stabilisés séparément avec différents ratios de ciment et de chaux, a été étudié. Pour chaque traitement, trois échantillons ont été préparés pour évaluer l'impact du ciment et de la chaux sur les propriétés mécaniques des briques. Les résultats de ces essais seront analysés et discutés dans la section suivante :

III.3.1 Essai de résistance à la compression

III.3.1.1 Mélanges contenant de la chaux

Les propriétés mécaniques des matériaux de construction sont les caractéristiques les plus importantes. L'essai de résistance à la compression (CS) a été effectué sur des échantillons secs de dimensions $10 \times 10 \times 10$ cm³ dans le laboratoire LTPE, Spa (Laboratoire des Travaux Publics de l'Est), conformément à la norme EN 12390-3 [134]. La [figure III.7](#) illustre la résistance moyenne à la compression des blocs testés. Les essais de résistance à la compression ont été réalisés en triplicata. Pour les sols A et B, il est à noter que pour le mélange argilo-calcaire, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du ratio de la chaux jusqu'à 8%. Au-delà de ce ratio, la résistance à la compression diminue. Les gains de résistance les plus élevés étaient de 48% et 101% pour les sols A et B, respectivement, par rapport à l'échantillon de référence. Ces résultats sont en concordance avec ceux des études précédentes [41,42]. Pour le sol C, le gain de résistance maximal a été atteint à un taux de chaux de 6 % et le gain de résistance obtenu était de 44 %.

Le sol A est caractérisé par son équilibre chimique qui comprend des pourcentages élevés de silice (SiO_2), de calcium (CaO) et un pourcentage significatif d'alumine (Al_2O_3). Cet équilibre facilite la réaction de la chaux avec la silice pour former du silicate de calcium (CaSiO_3) et de l'aluminate de calcium (CaAl_2O_4), ce qui augmente de manière significative la résistance des briques. Les équations chimiques suivantes illustrent ces processus :



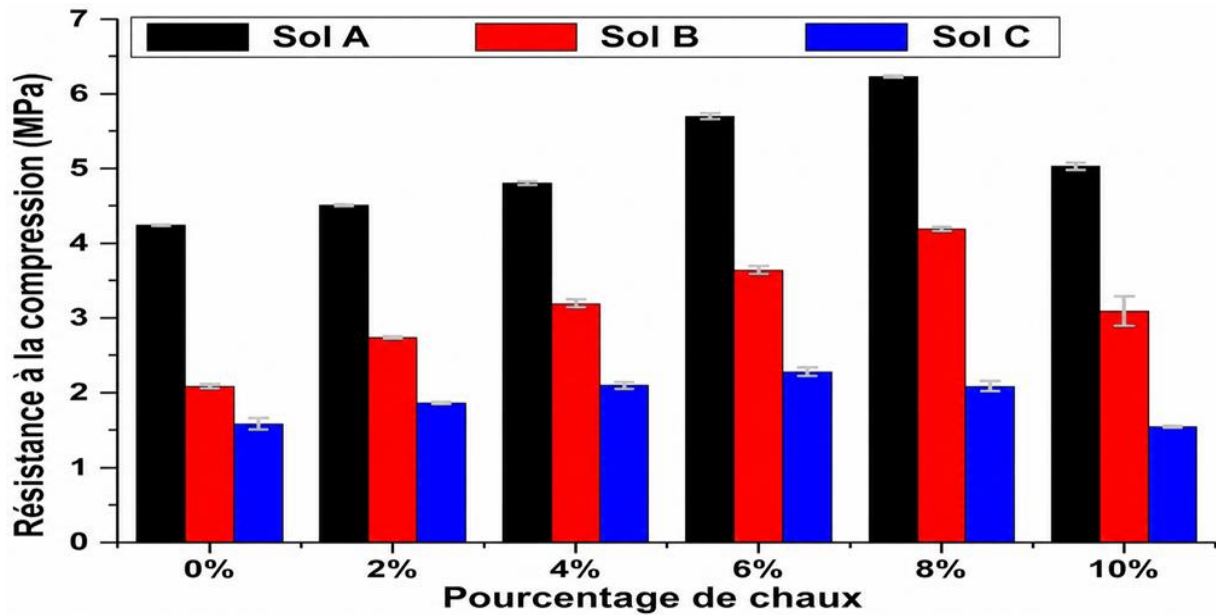


Figure III.7 Résistance à la compression de la chaux

Le sol A a atteint la résistance à la compression la plus élevée de 6,24 MPa à un ratio de 8 % de chaux, soit une augmentation de résistance de 47,47 % par rapport à l'échantillon de référence (non stabilisé). Ceci reflète la capacité du sol A à utiliser, efficacement, la chaux pour améliorer la résistance des briques d'argile. Cependant, lorsque 10 % de chaux ont été ajoutés, la valeur de la résistance à la compression est passée de 6,24 MPa à 5,02 MPa, soit une diminution de résistance de 19,55 % par rapport à l'échantillon contenant 8 % de chaux. Cette diminution est due à la formation de composés structurellement indésirables dans les briques d'argile, tels que des dépôts excessifs de CaO, qui peuvent entraîner une fragilité excessive. L'utilisation excessive de chaux, comme stabilisant, peut également augmenter les coûts de production. Cela met en évidence l'importance d'optimiser la proportion de chaux incorporée afin de garantir les propriétés mécaniques et physiques optimales des briques en terre cuite. Malgré ce taux de 8 %, la résistance à la compression reste supérieure à celle de l'échantillon de référence de 18,64 %. Pour le sol B, la résistance à la compression obtenue était de 4,18 MPa à 8 %. Une augmentation de 101 % a été obtenue par rapport à l'échantillon de référence. Cependant, lorsque 10 % de chaux a été utilisée, la valeur de la résistance à la compression a diminué de 26 %, passant de 4,18 MPa à 3,09 MPa. Il apparaît également que l'utilisation excessive de chaux dans le sol B peut entraîner une réduction des propriétés des briques d'argile.

Le sol C est caractérisé par une teneur élevée en calcite et en quartz avec des traces de kaolinite. Il a été observé que l'ajout de 6% de chaux permet d'atteindre une résistance à la

compression maximale de 2,28 MPa, avec un gain de résistance de 44%. Au-delà de ce ratio, la résistance à la compression diminue jusqu'à 1,55 MPa (la diminution observée de la résistance à la compression est de 1,9 %). Ceci peut être attribué à : (1) lorsqu'une quantité excessive de chaux est ajoutée (par exemple 10%), la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formée dépasse la capacité de réaction du sol. Il en résulte une accumulation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ non réagi, qui ne contribue pas à la résistance et peut même affaiblir la structure, (2) l'accumulation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ non réagi peut conduire à la formation de grandes structures cristallines dans la matrice argileuse. Ces cristaux sont fragiles et peuvent créer des microfissures dans la matrice de la brique, réduisant ainsi sa résistance globale. Par ailleurs, l'excès de chaux peut induire des contraintes internes résultant de l'expansion volumique des cristaux, contribuant ainsi à la formation de microfissures et à la dégradation des propriétés mécaniques du matériau [140].

Indépendamment de la quantité de chaux ajoutée, il a été observé que le sol A présente la résistance mécanique la plus élevée, suivi du sol B, puis du sol C. Cette différence de performance peut être attribuée à la teneur plus élevée en kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, voir [tableau.III .2](#)) dans le sol A par rapport aux sols B et C [141]. La kaolinite réagit plus efficacement avec la chaux, favorisant la formation d'une plus grande quantité de silicates de calcium hydratés (C-S-H) et d'aluminates de calcium hydratés (C-A-H). Ces produits de réaction, en particulier les C-S-H, sont responsables de l'amélioration des propriétés mécaniques du matériau en assurant une meilleure liaison entre les particules du sol et en contribuant à la cohésion et à la densification de la structure du matériau.

III.3.1.2 Mélanges stabilisés avec du ciment

La [figure III.8](#) montre la résistance moyenne à la compression obtenue pour les blocs de terre traités avec du ciment. La résistance à la compression a d'abord diminué pour tous les types de blocs de terre (A, B et C), puis a commencé à augmenter avec l'augmentation du pourcentage de ciment. Ces résultats sont en concordance avec les études précédentes sur les mortiers d'argile [142] et les blocs de terre [37]. On peut noter que les plus grandes résistances à la compression sont obtenues pour le sol A, quel que soit le taux de ciment ajouté. L'ajout de 2% de ciment diminue la résistance à la compression de 77%. Ceci peut s'expliquer par le fait que la faible quantité de ciment n'était pas suffisante pour former des liaisons chimiques efficaces avec les composants argileux. Au-delà du ratio de 4 % de ciment, l'ajout du ciment augmente par conséquent la résistance à la compression. La valeur maximale obtenue pour un ratio de 10 % était de 5,23 MPa, ce qui représente un gain de résistance de 24 %. Ces améliorations peuvent être attribuées à une microstructure plus uniforme, avec des pores plus

petits et l'absence de microfissures, lorsque les silicates de calcium hydratés (C-S-H) ont formé des liens entre les parties isolées [143]. Kalifala Dao et al [36] ont confirmé que le ciment améliore la résistance à la compression des blocs d'adobe.

La réaction du ciment avec l'eau conduit à la formation d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ce composé réagit avec la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3) existantes dans le sol pour former du silicate de

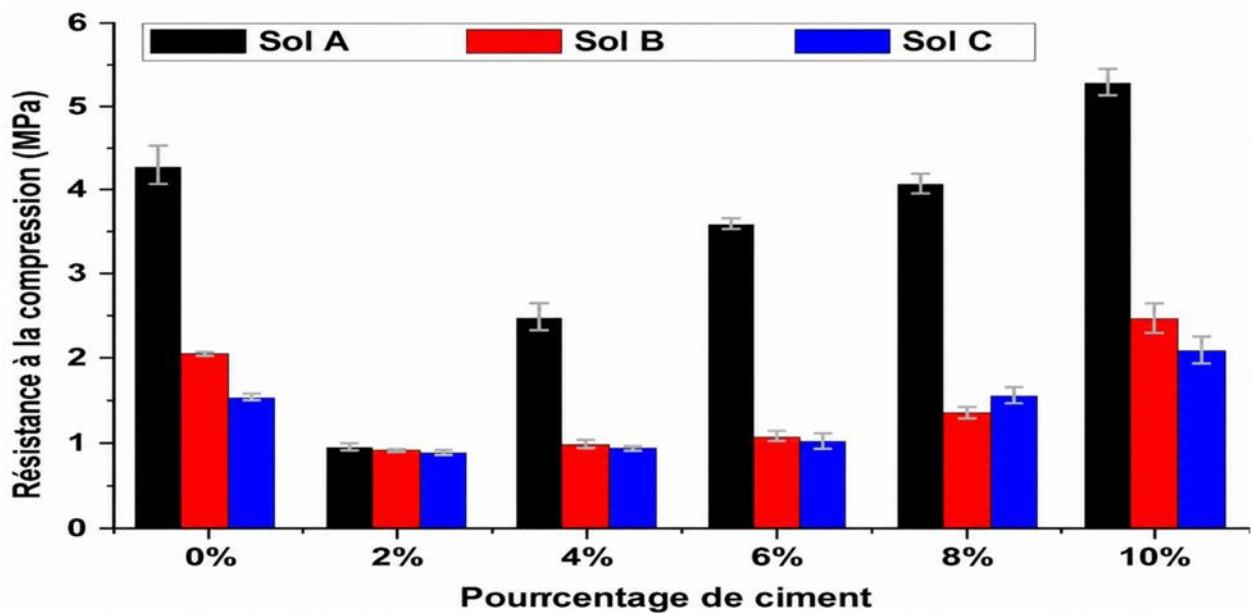


Figure III.8 Résistance à la compression du ciment

calcium hydraté (C-S-H) et de l'aluminate de calcium hydraté (C-A-H), qui participent activement au développement de la structure et à l'amélioration de la résistance mécanique de la brique.

Concernant le sol B qui présente de faibles valeurs de résistance à la compression par rapport au sol A, le sol B a présenté le même comportement que le sol A, lors de l'ajout du ciment. La seule différence est que l'augmentation de la résistance commence à partir d'un ratio de 8% de ciment.

L'incorporation de 2% de ciment entraîne une diminution de la résistance à la compression de 56%. Par conséquent, l'ajout de 4 % à 6 % entraîne aussi réduction de résistance. Après un rapport de 8%, la résistance à la compression a été améliorée et la valeur maximale obtenue était de 2,4 MPa, ce qui représente un gain de résistance de 15%. Le sol C a présenté également le même comportement que le sol B. Le ratio le plus bas de ciment a conduit à une réduction de la résistance à la compression de 44%. L'ajout de 4% à 6% de ciment maintient pratiquement

la même diminution de résistance. Après avoir dépassé un ratio de 8%, la résistance à la compression a augmenté, atteignant une valeur maximale de 2,1 MPa, ce qui représente une amélioration de 33% de la résistance. En comparant les trois sols étudiés, il paraît que le sol a présenté des résultats significatifs en termes de résistance initiale, ainsi qu'une amélioration notable avec l'ajout du ciment. Cependant, il présente également une réaction rapide, même à des teneurs de ciment relativement faibles (supérieures à 4 %). Les principaux résultats concernant la résistance à la compression des briques stabilisées au ciment sont cohérents avec ceux rapportés par Boffoué et al [37].

III.3.2 Essai de résistance à la flexion

III.3.2.1 Mélanges stabilisés avec de la chaux

Un essai de flexion en trois points a été réalisé pour examiner les propriétés mécaniques des échantillons testés contenant différents ratios de chaux (0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 %), conformément à la norme NF EN 196-1 [44]. La [figure III.9](#) montre la résistance à la flexion obtenue pour tous les sols testés. Les valeurs présentées correspondent à la moyenne des résultats obtenus sur trois spécimens pour chaque essai. Il est à noter que, pour l'ensemble des sols étudiés, la résistance à la flexion a suivi une tendance similaire à celle observée lors des essais de compression. Elle augmente avec l'incorporation de chaux jusqu'à un taux de 8 %, au-delà duquel une diminution est observée.

Ces observations sont en accord avec celles obtenues par Koadri et al [144]. Dans leur étude, les auteurs ont constaté que l'ajout de 9 % de chaux a donné la plus grande résistance à la flexion. Au-delà de ce point, la résistance à la flexion a diminué de manière significative.

Dans le cas du sol A, une amélioration significative de la résistance à la flexion a été observée, passant de 0,91 MPa sans chaux à 4,64 MPa avec 8 % de chaux, soit une augmentation d'environ 400 %.

En revanche, l'augmentation du ratio à 10 % a entraîné une diminution de la résistance à la flexion à 3,75 MPa, soit une réduction de 19 % par rapport au mélange à 8 %. Néanmoins, cette valeur reste significativement plus élevée que celle obtenue pour le mélange de référence. Dans le cas du sol B, une légère amélioration de la résistance à la flexion a été obtenue de 0,8 MPa à 1,52 MPa, soit une amélioration de 90%. Pour le sol C, une amélioration de la résistance à la flexion a été observée jusqu'à 6 % de chaux, la résistance à la flexion passant de 0,7 MPa à 1,48 MPa, soit une amélioration de 112 %. Cependant, lorsque la teneur en chaux a été augmentée jusqu'à 8 %

Pour les sols A et B, et jusqu'à 6 % pour le sol C, une diminution de la résistance à la flexion a été observée. Cette diminution pourrait être due à des réactions accrues qui peuvent conduire à la formation de composés indésirables ou à des effets

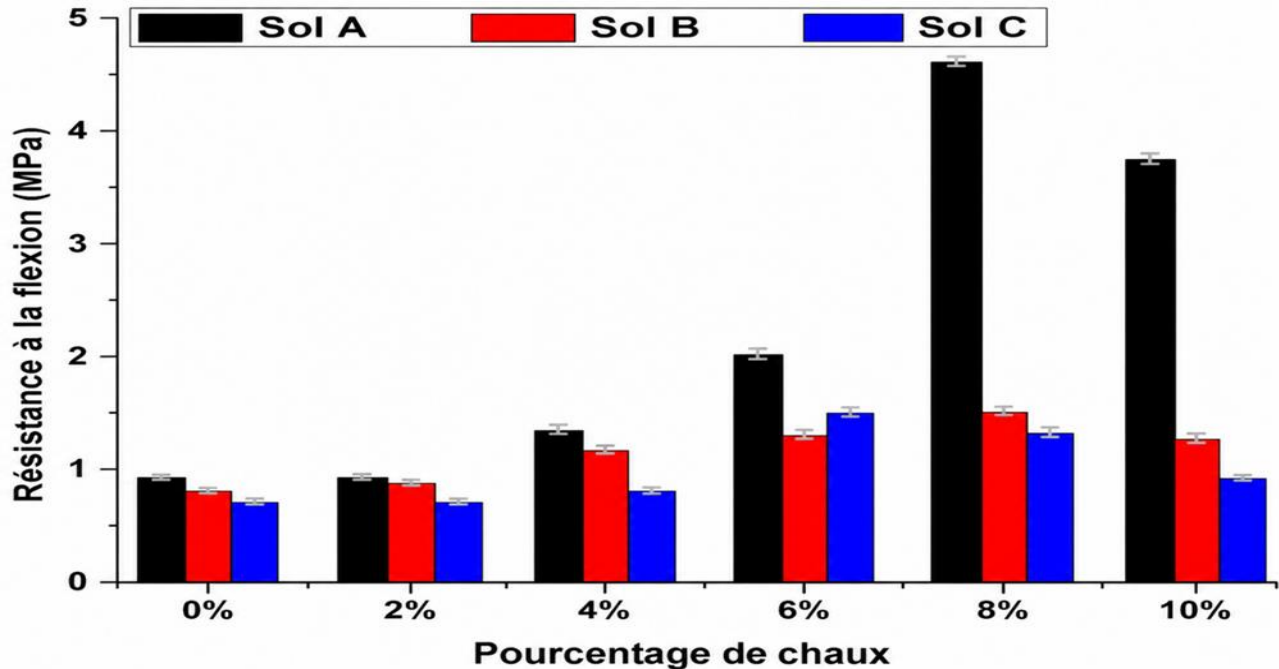


Figure III.9 Résistance à la flexion de la chaux

inattendus sur certains minéraux du sol lorsque la chaux est utilisée à un pourcentage élevé. On peut conclure que la chaux a un effet bénéfique sur l'amélioration des propriétés mécaniques des blocs de terre, à condition que son dosage optimal soit adapté à chaque type de sol.

III.3.2.2 Mélanges stabilisés avec du ciment

La figure III.10 montre les résultats obtenus pour la résistance à la flexion des échantillons testés. On peut observer que les sols étudiés ont le même comportement. Ils ont présenté une réduction de la résistance à la flexion avec l'ajout du ciment à un ratio bien déterminé. Ensuite, l'augmentation des ratios de ciment conduit à une diminution de la résistance à la flexion. Pour le sol A, l'ajout de 2% de ciment a réduit la résistance de 25%. Au-delà du ratio de 4%, la résistance commence à augmenter et la valeur maximale atteinte a été obtenue pour un pourcentage de 10%, avec un gain de résistance de 103%. Ceci peut être expliqué par le fait que le sol A est riche en Kaolinite par rapport aux sols B et C. La Kaolinite réagit avec la chaux, favorisant la formation d'une plus grande quantité de silicate de calcium hydraté (C-S-H) et d'aluminate de calcium hydraté (C-A-H). Ces produits de réaction renforcent la structure et améliorent la résistance mécanique des briques. Ce composé contribue à la formation d'une

matrice solide et stable, liant les particules d'argile et renforce la cohésion du mélange. Les résultats obtenus sont en accord avec des recherches précédentes élaborées par Pkla et al [142].

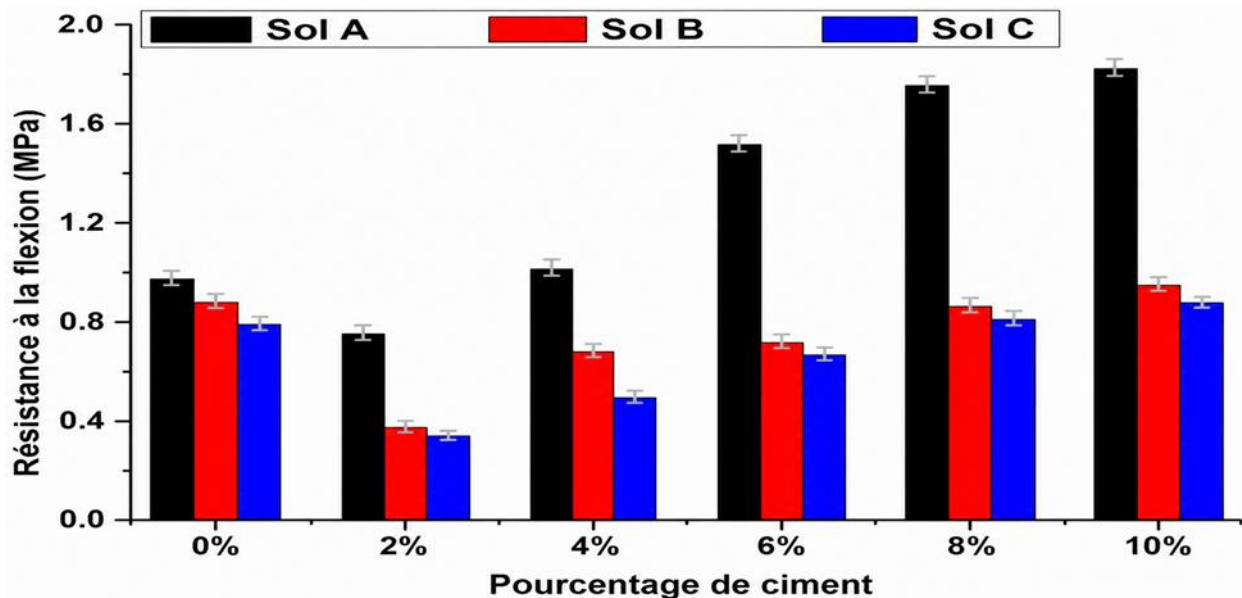


Figure III.10 Résistance à la flexion du ciment

Dans le cas du sol B, l'ajout de 2% de ciment diminue la résistance à la flexion de 56%. Cependant, l'augmentation du pourcentage de ciment (jusqu'à 4%) augmente la résistance à la flexion. La résistance maximale obtenue à 10 % était de 0,91 MPa, soit un gain de résistance de 15 %. La réaction chimique entre le ciment et les constituants du sol B, tels que le quartz et la calcite, entraîne la formation de liaisons chimiques fortes, renforçant la résistance à la flexion des briques de terre et améliorant leurs propriétés structurelles globales. Une réduction similaire de la résistance est observée dans le sol C avec l'ajout de 2% de ciment. La résistance la plus élevée est obtenue avec une teneur en ciment de 10 %, ce qui représente une augmentation de 20 % de la résistance. Ceci peut être attribué aux mêmes mécanismes que ceux observés dans le sol B. Il est clairement observé que le **sol A** a des réponses significatives à l'ajout du ciment par rapport aux autres sols étudiés, où le gain de résistance atteint 103%. Ceci est attribué à sa teneur élevée en calcite (CaCO_3).

III.3.3 Absorption totale

III.3.3.1 Échantillons contenant de la chaux

Les blocs stabilisés à la chaux ont maintenu leur cohésion et conservé leur forme initiale tout au long des 4 jours d'immersion, sans présenter de déformation ou de dégradation visible.

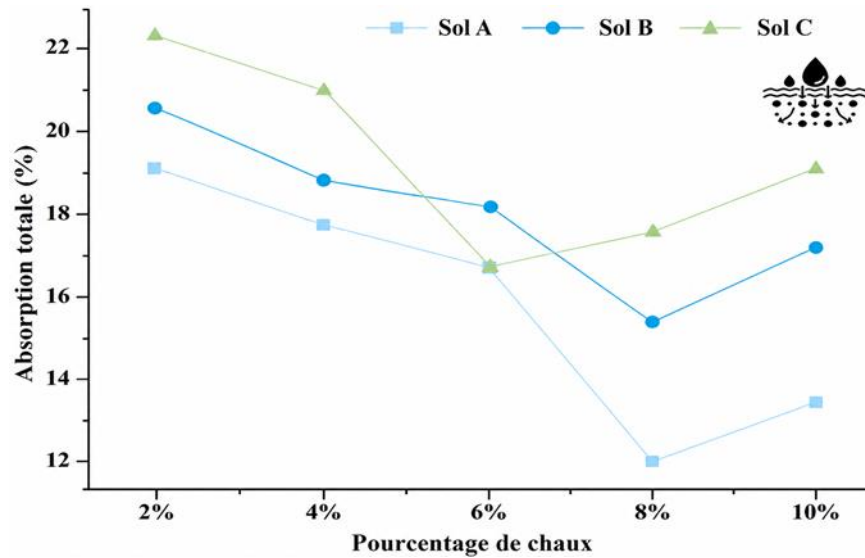


Figure III.11 Variation de l'absorption totale en fonction de la teneur en chaux

La **figure III.11** montre les résultats obtenus sur l'effet de la chaux sur l'absorption d'eau des briques d'argile. Dans le sol A, l'ajout de chaux aux mélanges a diminué l'absorption d'eau (WA). Une baisse excessive de l'absorption a été observée à 8 % de la proportion de ciment. Le coefficient d'absorption d'eau se situe entre 11,96 % et 19,14 %. L'augmentation de la teneur en chaux diminue l'absorption d'eau. Le coefficient d'absorption d'eau le plus faible a été constaté à 8 % et la réduction a été de 36 %. Cela peut s'expliquer par le fait que l'ajout de chaux à l'argile entraîne la formation de C-S-H, qui remplit les pores des briques et, par conséquent, l'absorption d'eau diminue [145,146]. Un comportement similaire a été observé pour le sol B, comme dans le cas du sol précédent. Le coefficient d'absorption d'eau était compris entre 15,48% et 20,54%. Au même taux de chaux de 8%, le sol B présentait un coefficient d'absorption d'eau faible de 15,48%, ce qui indique une réduction de 25%. Cela peut s'expliquer par le fait que le quartz, minéral chimiquement inerte, ne contribue pas au processus de densification de la matrice du mélange. Par conséquent, la porosité de l'argile reste plus élevée, ce qui permet à l'eau de pénétrer plus facilement, entraînant une augmentation de l'absorption d'eau. Dans le cas du sol C, un changement considérable de l'AO a été observé avec l'augmentation de la teneur en chaux. L'absorption a diminué de 22,34 % à environ 16,77 % avec l'application de 6 % de chaux, avant de remonter à environ 19,17 % lorsque 10 % de chaux ont été ajoutés.

Les résultats du test ont montré une diminution de l'absorption d'eau, accompagnée d'une augmentation de la résistance à la compression, au fur et à mesure que la teneur en chaux augmentait. Ces résultats concordent bien avec ceux rapportés par Shubbar et al [147]. On peut en conclure que pour les argiles courantes, une teneur en chaux de 5 à 8 % est recommandée

pour assurer une stabilisation efficace et réduire l'absorption d'eau (WA). Pour les argiles moins plastiques ou contenant une plus grande proportion de calcite, une teneur en chaux plus faible de 2 à 5 % peut être suffisante.

III.3.3.2 Absorption totale des éprouvettes contenant du ciment

La **figure III.12** montre l'absorption totale pour tous les échantillons testés contenant du ciment. Les sols A et B ont présenté des tendances similaires. Pour 2% de ciment ajouté, les valeurs obtenues étaient de 16,84% et 17,80% pour les sols A et B, respectivement. L'absorption totale d'eau a diminué avec l'augmentation de la teneur en ciment, atteignant sa valeur la plus basse à 10%.

Pour les sols A et B, les valeurs enregistrées étaient respectivement de 11,95% et 13,07%. Le sol C a montré un comportement similaire que ceux des sols précédents. Bien que le sol C affiche systématiquement un WA plus élevé que les autres sols, il suit la même tendance d'évolution lorsque la proportion de ciment est augmentée. Le coefficient d'absorption d'eau était de 29.05% à 2% de ciment, puis a diminué progressivement à 18.82% à 10%. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que les sols A et B sont riches en calcite. Cette dernière, présente une excellente réactivité avec le ciment et forme des composants stabilisés (C-S-H), ce qui densifie la structure du mélange en réduisant la porosité.

Cependant, le sol C, caractérisé par une teneur élevée en quartz, présente une réactivité limitée avec les composants du ciment, comme mentionné précédemment. Cette faible réactivité réduit la formation des composés stabilisants, ce qui limite l'efficacité du ciment en tant qu'agent de stabilisation.

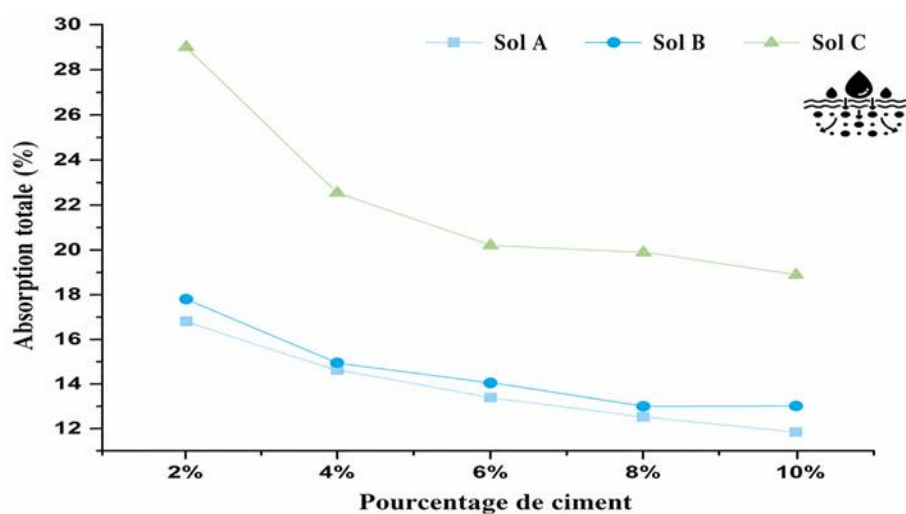


Figure III.12 Variation de l'absorption totale en fonction de la teneur en ciment

En comparant l'effet de la chaux et du ciment sur l'absorption d'eau dans les briques de terre pour tous les sols étudiés. Il a été observé que le ciment est plus efficace que la chaux pour réduire l'absorption d'eau dans les trois types de sols étudiés. Par exemple, dans le sol A, le taux d'absorption d'eau diminue continuellement avec l'augmentation de la teneur en ciment, atteignant 11,95 % à 10 % de ciment, tandis que le taux d'absorption avec la chaux diminue jusqu'à 8 % pour atteindre 11,96 %, puis augmente légèrement à 10 %. Pour le sol B, l'ajout du ciment entraîne une diminution progressive du coefficient WA, atteignant 13,07 % à 10 % de ciment. En revanche, la chaux réduit le WA jusqu'à 15,49 % à 8 %, mais celui-ci remonte à 17,25 % lorsque la teneur en chaux est portée à 10 %. Enfin, pour le sol C, l'effet du ciment se révèle plus marqué : le taux d'absorption diminue significativement, passant de 29,05 % pour 2 % de ciment à 18,82 % pour 10 %. En comparaison, la chaux réduit le coefficient d'absorption (WA) à 16,78 % pour une teneur de 6 %, mais celui-ci augmente ensuite pour atteindre 19,17 % à 10 %. De manière générale, le ciment présente un effet plus progressif et plus stable que la chaux dans la réduction de l'absorption d'eau.

III.4 Conclusion

L'objectif principal de la stabilisation des briques de terre dans cette étude est d'identifier le sol le plus approprié à la brique de terre et le stabilisateur le plus efficace, ainsi que de trouver le ratio optimal de stabilisateur, approprié au sol sélectionné, pour s'assurer que les propriétés mécaniques des briques sont optimisées. Pour atteindre cet objectif, trois sols ont été testés et deux types de stabilisateurs, la chaux et le ciment, ont été utilisés, et leurs effets respectifs sur la résistance à la compression et à la flexion, ainsi que sur les propriétés d'absorption d'eau, ont été analysés. Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'incorporation de 8 % de chaux dans les briques de terre a amélioré la résistance à la compression de 47 % et 100 % pour les sols A et B, respectivement. Cependant, pour le sol C, seulement 6 % de chaux ont donné une augmentation de la résistance de 44%.
- L'ajout du ciment jusqu'à 10 % a augmenté la résistance à la compression de 24 %, 15 % et 33 % pour les sols A, B et C, respectivement.
- La résistance à la flexion de l'argile a été améliorée avec l'ajout de 8 % de chaux de 400 % et de 112 % avec l'ajout de 6 % de ciment pour le sol C. Cependant, les valeurs de résistance à la flexion les plus élevées ont été obtenues avec l'ajout de 10 % de ciment. Les gains étaient de 103%, 15% et 20% pour les sols A, B et C, respectivement.
- Une diminution significative de l'absorption totale d'eau a été obtenue à 8% de chaux pour tous les sols. Après ce pourcentage, l'absorption totale d'eau commence à augmenter.

Sur la base de ces résultats, le sol A (M'sila) a été sélectionné pour compléter la deuxième partie de l'étude, car il est le sol qui a mieux réagi au processus de stabilisation et a donné une amélioration plus significative de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion. En ce qui concerne le processus de stabilisation, un taux de chaux de 8 % s'est révélé être le choix optimal, offrant des améliorations significatives de la résistance mécanique tout en maintenant l'absorption d'eau dans des limites acceptables.

Cette formulation sera retenue pour la seconde phase de l'étude, qui portera sur l'incorporation de déchets de masques médicaux dans des briques d'argile. Cette approche pourrait ouvrir de nouvelles perspectives pour la production de matériaux de construction plus durables et respectueux de l'environnement.

CHAPITRE IV

EFFET DES DECHETS SUR LE COMPORTEMENT DES BLOCS DE TERRE

IV.1 Introduction

Cette étude vise à développer des briques de terre plus efficaces en deux phases principales. La première consiste à identifier le sol le plus approprié et à sélectionner le stabilisateur le plus efficace pour obtenir les meilleures propriétés mécaniques. La seconde consiste à introduire des déchets de masques médicaux dans la composition des briques, dans le cadre d'une approche durable qui contribue à réduire les déchets environnementaux et à produire des matériaux de construction plus respectueux de l'environnement. Après avoir achevé le troisième Chapitre de l'étude et sélectionné le sol **A (M'sila)** comme matériau de base, avec 8 % de chaux comme stabilisateur optimal, l'accent sera maintenant mis sur l'incorporation de déchets de masques médicaux et l'analyse de leur impact sur les propriétés des briques d'argile. Cette approche représente une étape vers la promotion du concept d'économie circulaire dans le secteur de la construction, en réutilisant les déchets de manière innovante afin de minimiser l'impact sur l'environnement et d'améliorer l'efficacité des matériaux de construction.

IV.2 Matériaux utilisés

IV.2.1 Le sol et la chaux comme constituants de base

Sur la base des résultats du chapitre 4, le **sol A** et la chaux ont été sélectionnés comme stabilisateur à 8 %, en raison des excellentes performances de cette formulation en ce qui concerne les propriétés mécaniques. Cette formulation a été utilisée comme base pour les expériences présentées dans ce chapitre. Il convient de noter que les propriétés du sol sélectionné, du stabilisateur (chaux), ainsi que de l'eau utilisée dans le processus de préparation, ont été couvertes en détail dans le chapitre 4, à la fois en termes de propriétés physiques et chimiques et d'aptitude à la stabilisation. Le **sol A** stabilisé avec 8 % de chaux a montré une amélioration significative de la résistance à la compression, ce qui a renforcé la stabilité globale du mélange. Pour stabiliser les conditions expérimentales et garantir des résultats comparables, le même type de chaux et la même source d'eau utilisées dans les expériences précédentes ont été conservées, en adhérant à la même méthodologie de préparation adoptée dans la phase précédente.

IV.2.2 Masques chirurgicaux

De manière générale, le **FM** médical jetable à trois couches en polypropylène a été utilisé. La couche intérieure (**figure IV.1A**) est douce et absorbante : elle absorbe l'humidité dégagée par l'utilisateur. La couche intermédiaire (**figure IV.1B**) est un matériau fondu-soufflé qui prévient les microbes. La couche extérieure (**figure IV.1C**) est un tissu conçu pour isoler les

liquides émis par l'utilisateur. L'analyse microscopique des trois couches montre la présence de nombreuses microfibrilles dans les trois couches. Des vides peuvent être observés dans les couches intérieure et extérieure, ce qui indique généralement une absorption d'eau plus importante et une densité plus faible. Lors de l'ajout de morceaux de **FM** à la matrice de briques d'argile, l'adhésion des morceaux de masque à la matrice joue un rôle important dans l'amélioration physique et mécanique des briques d'argile, et donc l'augmentation de la taille des morceaux accroît leur adhésion aux briques de terre et devrait améliorer le comportement des briques d'argile. La plus grande dimension choisie est de 2 cm afin d'éviter tout problème lié à la courbure des morceaux pendant le processus de mélange. L'effet de la dimension peut être caractérisé en comparant les résultats obtenus avec des briques mélangées avec des morceaux de masque de dimensions $2 \times 1 \text{ cm}^2$ et $1 \times 0,5 \text{ cm}^2$. Les pièces sont d'abord préparées en retirant le fil du nez et les boucles d'oreilles, puis coupées en différentes tailles : $1 \times 2 \text{ cm}^2$ et $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ **Figure IV.2**. Le **tableau IV 1** présente les propriétés physiques des pièces du masque médical.



Figure IV. 1 Les trois couches d'un masque facial



Figure IV.2 Dimensions des pièces de masques chirurgicaux considérées dans cette étude : (a) **MiS** et (b) **MiL**.

Tableau IV.1 Propriétés physiques des pièces des masques chirurgicales

Absorption d'eau 24 h (%)	8.8
Masse volumique kg/m³	25

IV.2.2.1 Masse volumique apparente des pièces de masque facial

La densité apparente des pièces de masques médicaux a été mesurée selon les recommandations du Comité technique RILEM 236. La procédure consistait à sécher les morceaux à 50°C pendant 48 h, puis à les placer dans un récipient cylindrique aux dimensions suivantes (15 cm de diamètre et 25 cm de hauteur), jusqu'à ce qu'ils atteignent environ la moitié de la hauteur du récipient. Le cylindre a ensuite été secoué dix fois, selon le protocole utilisé par Broward et al. (2018) pour déterminer la densité apparente des agrégats végétaux. Le volume correspondant est ensuite déterminé, reconstitué avec de l'eau et pesé. Répéter cette procédure trois fois, calculer la moyenne et utiliser les données pour calculer la densité apparente selon l'équation suivante :

$$\rho = \frac{M}{M_w} \cdot \rho_w$$

P : Densité apparente des pièces du masque facial

M: Masse des pièces du masque facial

M_w: Masse d'eau équivalente au volume occupé par les pièces du masque facial (kg).

P : Masse volumique de l'eau (1000 kg/m³)

Les mesures révèlent à une masse volumique moyenne $\rho = 25 \text{ kg/m}^3$

IV.2.2.2 Absorption des Pièces de masque facial

L'absorption d'eau des masques médicaux a été testée en les séchant d'abord dans un four à une température de $105 \pm 5 \text{ °C}$ jusqu'à la stabilisation de leur masse, puis en enregistrant leur poids sec. Ils ont ensuite été immergés dans de l'eau distillée à température ambiante pendant 10 à 15 minutes afin de garantir leur saturation. Après les avoir retirés, ils ont été placés sur une surface absorbante pour éliminer l'eau de surface, afin de mesurer directement leur poids saturé.

IV.2.3 Mélanges et confection des éprouvettes

Les échantillons de brique de terre ont été préparés en ajoutant des déchets déchiquetés provenant de masques médicaux (**FM**). Dans un premier temps, la terre a été mélangée manuellement avec 8 % de chaux vive (p/p) pendant environ 2 minutes jusqu'à l'obtention d'une couleur et d'une texture homogènes. Ensuite, des morceaux de **FM** ont été ajoutés au mélange dans des proportions volumétriques de : 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 % et 40 %, puis remélangés pendant encore deux minutes avant d'ajouter de l'eau. Deux formes différentes de morceaux de **MF** ont été adoptées dans chaque formulation ; les formulations étiquetées **MiS** comportaient des morceaux de 2 x 1 cm² et les formulations étiquetées **MiL** des morceaux de 0,5 x 1 cm². La composition détaillée de chaque mélange est indiquée dans le [tableau IV 2](#). Tous les échantillons ont été préparés selon le même protocole que dans le chapitre 4 afin de garantir la cohérence des procédures de préparation. Comme le montre la [figure IV.3](#), trois échantillons de chaque formulation ont été testés pour calculer les moyennes des propriétés mesurées.

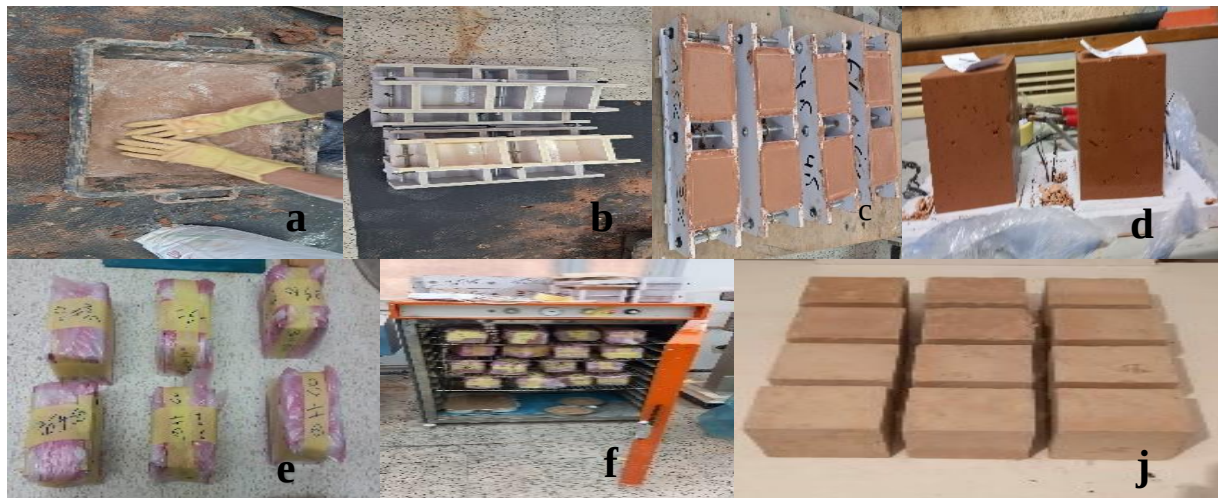


Figure IV.3 Préparation des échantillons : **a)** Préparation du mélange, **b)** Préparation des moules, **c)** Remplissage des moules, **d)** Démoulage, **e)** Conservation des échantillons dans un film plastique et **f)** Échantillons au four à 65°C **g)** Échantillons prêts à l'emploi

Tableau IV.2 Composition des mélanges

Formulation	MASQUE		SOL		Chaux		L'eau	
	Ratio (%)	Quantité (Kg/m ³)	Ratio (%)	Quantité (Kg/m ³)	Ratio (%)	Quantité (Kg/m ³)	Ratio (%)	Quantité (Kg/m ³)
M0*	0	0	100	1202.00	8	96.16	0.333	400.27
M5	5	1.25	95	1141.90	8	91.35	0.333	380.36
M10	10	2.50	90	1081.80	8	86.54	0.333	360.46
M15	15	3.75	85	1021.70	8	81.74	0.333	340.56
M20	20	5.00	80	961.60	8	76.93	0.333	320.65
M25	25	6.25	75	901.50	8	72.12	0.333	300.75
M30	30	7.50	70	841.40	8	67.31	0.333	280.85
M35	35	8.75	65	781.30	8	62.50	0.333	260.94
M40	40	10.0	60	721.40	8	57.70	0.333	241.04
* Mélange de référence								

IV.3 Tests effectués:

Pour chaque essai, trois éprouvettes ont été utilisées afin d'assurer la fiabilité et la répétabilité des résultats expérimentaux.

IV.3.1 Caractéristiques physiques

IV.3.1.1 Densité apparente

Pour déterminer l'effet de la découpe du masque sur la densité apparente des briques d'argile, celle-ci a été calculée selon la norme NF EN 1015-10/A1 en utilisant la relation suivante : $\rho = M/V$ Où :

- M est la masse de l'échantillon sec en kilogrammes
- V est le volume de l'échantillon sec en mètre cube

IV.3.1.2 Essai à l'ultra-son:

L'objectif de cet essai est de déterminer la vitesse de déplacement des ondes sonores à l'aide d'un dispositif qui détermine le temps nécessaire à l'onde ultrasonique pour franchir la distance entre l'émetteur et le récepteur installés aux deux extrémités de l'échantillon préparé pour cet essai, comme le montre la **figure IV.4**. La position de l'émetteur et du récepteur a été recouverte d'une couche de graisse afin d'assurer la continuité des ondes entre l'émetteur, l'échantillon et le récepteur. Avant de commencer le processus de mesure, l'instrument a été calibré à l'aide d'une tige métallique. L'essai a été réalisé conformément à la norme NFP18-418



Figure IV.4. Test de vitesse de propagation

IV.3.1.3 Absorption totale

L'expérience d'absorption d'eau du chapitre 5 a été menée avec la même méthodologie et les mêmes procédures expérimentales que celles adoptées au chapitre 4, afin de garantir la stabilité des conditions d'essai et de maintenir la comparabilité des résultats.

IV.3.2 Caractéristiques mécaniques

Les essais de compression et de traction ont été réalisés à l'aide du même appareil que celui utilisé au chapitre 4, en respectant pleinement les mêmes protocoles de préparation et d'exécution, ce qui a permis de garantir la cohérence et la comparabilité des résultats. Comme le montrent les **figures.IV.5 a et b**.

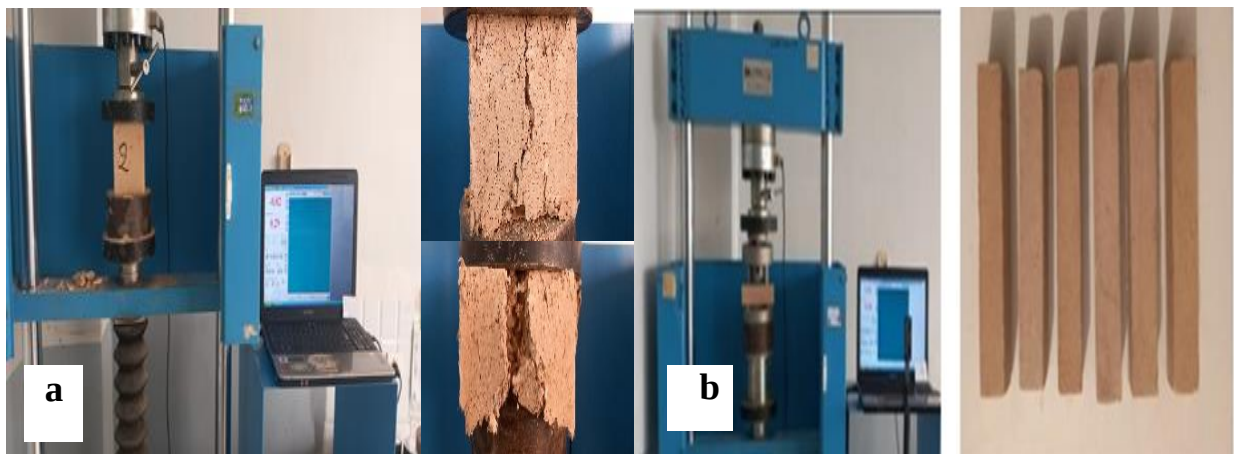


Figure IV.5 a) Essai de résistance à la compression **b)** Essai de résistance à la flexion

IV.3.3 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques ont été déterminées conformément à la norme NFE993-15 à l'aide d'un transformateur de courant (**CT**), comme le montre la **figure IV. 6**. Ce dispositif est basé sur le principe du fil chaud transitoire conformément à la norme ISO 8894-1 : 1987 [148]. Les mesures ont été effectuées sur des échantillons de dimensions 10x10x4 cm³ à l'aide d'une sonde à fil chaud, qui se compose d'un fil chauffant et d'un capteur de température. La sonde est insérée entre deux échantillons identiques aux surfaces planes et lisses pour éviter tout contact avec l'air. Cette procédure permet de mesurer la conductivité thermique de n'importe quel matériau. Les mesures ont été effectuées au laboratoire du CNERIB à Souidania, en Algérie, à une température de 22°C. La chaleur spécifique (Cp), l'effusivité thermique (e) et la capacité thermique volumétrique (C) ont été calculées à l'aide des relations suivantes [149] :

$$C = C_p \times \rho$$

$$e = \sqrt{(\lambda \times C)}$$

Où : - C la capacité thermique volumétrique, exprimée en (J.m⁻³.K⁻¹).

- Cp est la chaleur spécifique, exprimée en J.kg⁻¹.K⁻¹.
- ρ est la densité apparente, exprimée en (kg/m³).
- e est l'effusivité thermique, exprimée en J.m⁻².K⁻¹.s^{-1/2}
- λ est la conductivité thermique, exprimée en W.m⁻¹.K⁻¹

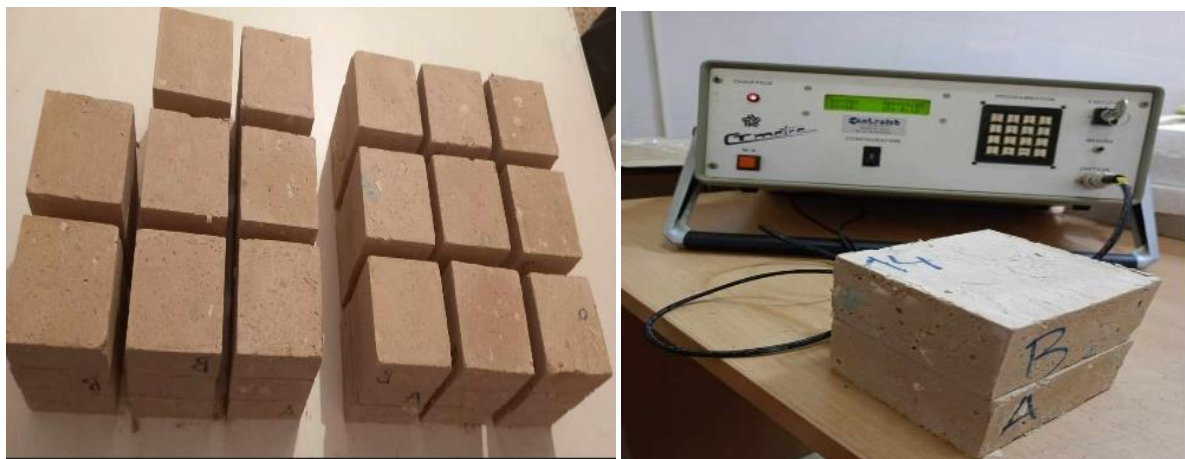


Figure IV.6 Test thermique

IV.4 Résultats et discussions

IV.4.1 Effet des déchets de masques sur les caractéristiques physiques

IV.4.1.1 La Densité

Des études antérieures ont montré que la densité apparente des briques de terre varie entre 1540 kg/m^3 et 1950 kg/m^3 [150]. Dans cette recherche, des briques de terre ont été fabriquées avec l'ajout de morceaux de masques médicaux (FM) de différentes tailles ($0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ et $1 \times 2 \text{ cm}^2$) et de différentes proportions d'additifs (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 %, 35 % et 40 %). La densité a été mesurée pour chaque cas afin de déterminer la relation entre la proportion et les dimensions des additifs et la densité des briques d'argile, afin de comprendre les effets possibles de ces additifs sur les propriétés mécaniques des briques.

Les données expérimentales ont clairement montré l'effet de l'introduction de FM sur la densité des briques. Dans le cas de l'échantillon de référence sans FM (0 %), la densité était de $1620,71 \text{ kg/m}^3$.

Avec l'introduction de 5% de FM, une légère diminution de la densité a été observée, atteignant $1564,11 \text{ kg/m}^3$ pour $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ et $1558,86 \text{ kg/m}^3$ pour $1 \times 2 \text{ cm}^2$, ce qui indique que la présence de FM contribue à la formation de micropores entraînant une réduction de la densité.

Cette diminution progressive de la densité s'est poursuivie à mesure que le rapport FM augmentait, comme le montre la [figure IV.7](#). À 10 %, la densité est tombée à environ $1531,54 \text{ kg/m}^3$ pour les petits morceaux et à $1523,28 \text{ kg/m}^3$ pour les gros morceaux. Lorsque le pourcentage a continué à augmenter jusqu'à 15 %, 20 %, 25 % et même 40 %, on a constaté que la densité continuait à diminuer, atteignant $1377,79 \text{ kg/m}^3$ pour $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ et $1336,56 \text{ kg/m}^3$ pour $1 \times 2 \text{ cm}^2$. Cette diminution est attribuée à la nature du MF médical, qui se compose de matériaux plus légers que l'argile, ce qui contribue à la baisse globale de la densité du mélange.

En outre, la capacité élevée d'absorption d'eau des matériaux FM - atteignant 90 % de saturation en seulement 10 minutes [108] affecte directement la densité des briques. Après le séchage des échantillons, l'eau absorbée dans les morceaux de FM s'évapore, créant des pores internes dans les briques d'argile, réduisant ainsi leur masse sans modifier sensiblement leur volume, ce qui donne des briques plus légères et moins denses.

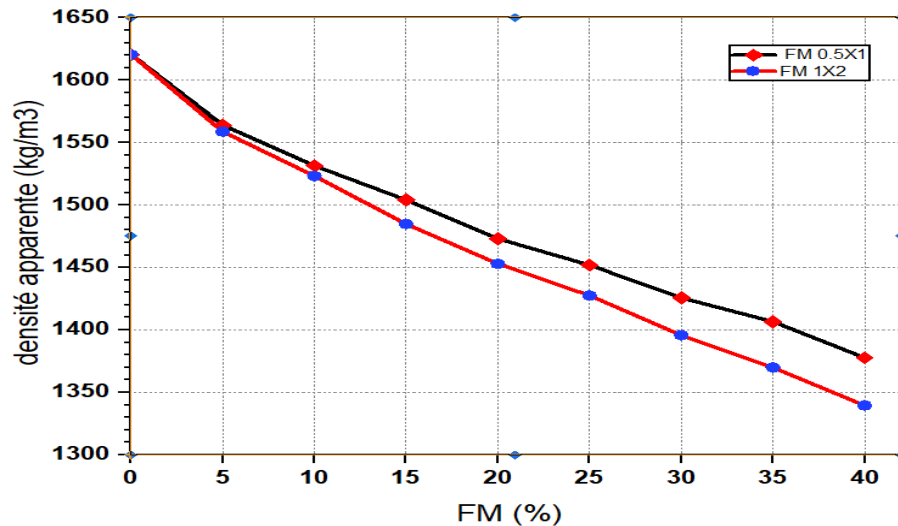


Figure IV.7 Variation de la densité apparente

Les résultats ont montré que la forme et la taille des pièces FM jouent un rôle important dans l'influence de la densité. Les briques contenant des blocs FM de $1 \times 2 \text{ cm}^2$ ont enregistré une densité plus faible que celles de $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ au même ratio. Par exemple, à 5 %, la densité était de $1558,86 \text{ kg/m}^3$ pour les grandes pièces contre $1564,11 \text{ kg/m}^3$ pour les petites pièces. Lorsque le ratio est passé à 10 %, la différence est devenue encore plus prononcée, avec une densité de $1523,28 \text{ kg/m}^3$ pour les grandes pièces et de $1531,54 \text{ kg/m}^3$ pour les petites pièces, comme le montre la **figure IV.7**. Cette tendance à la baisse s'est poursuivie lorsque le ratio FM est passé à 25 % et 30 %, avec une densité de $1395,74 \text{ kg/m}^3$ pour les briques de grande taille, contre $1425,65 \text{ kg/m}^3$ pour les briques de petite taille.

Cet effet est attribué au fait que les gros morceaux de FM créent des pores et des vides plus grands et moins réguliers dans la brique, ce qui entraîne une réduction plus importante de la densité par rapport aux petits morceaux.

IV.4.1.2 La vitesse de propagation des ondes à l'ultra-son

Un test de vitesse de propagation des ultra -sons a été réalisé pour évaluer la porosité des échantillons préparés et pour clarifier l'effet du rapport **FM** sur la vitesse d'impulsion acoustique dans les briques d'argile. Les résultats ont montré que la vitesse d'impulsion était la plus élevée à un taux de MF de 0 %, atteignant $2116,53 \text{ m/s}$. Avec l'ajout d'un rapport **FM** de 5 %, une diminution de la vitesse de 3,14 % a été observée pour $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ et de 4,12 % pour $1 \times 2 \text{ cm}^2$. Cette diminution indique un effet initial sur la capacité des ondes à se déplacer. Cette tendance s'est poursuivie à mesure que le rapport **FM** augmentait, comme le montre la **figure IV.8**.

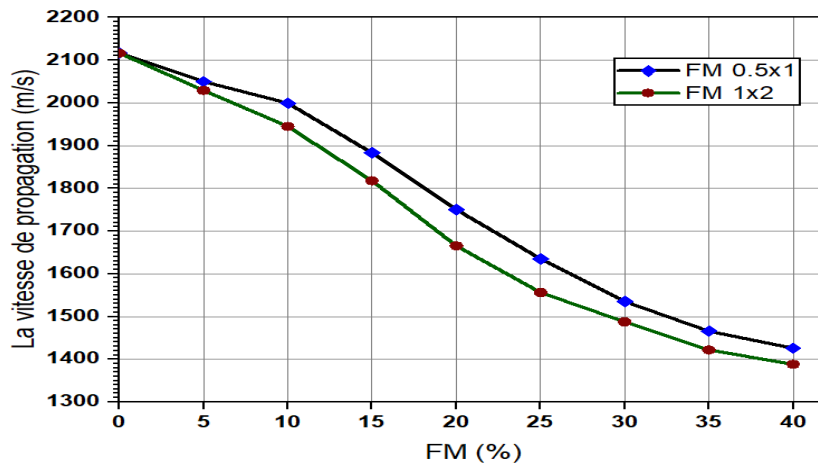


Figure IV.8 Variation de la vitesse de l'ultra-son

Pour un rapport **FM** de 40 %, la vitesse est tombée à 32,64 % et 34,32 % pour les pièces de dimensions (0,5 x 1 cm²) et (1 x 2 cm²), respectivement. Cette diminution progressive de la vitesse peut s'expliquer par le fait que l'augmentation du rapport **FM** entraîne une augmentation de la taille des vides à l'intérieur des briques d'argile, la vitesse de propagation des ondes dans les solides étant plus élevée que dans l'air. De plus, cette vitesse est affectée par la nature texturale des pièces **FM**, qui contiennent un grand nombre de tissus superposés, ainsi que par les vides causés par l'évaporation de l'eau absorbée par les pièces **FM**, qui entrave le passage des ondes ultrasonores. À mesure que les vides augmentent, les ondes sonores subissent davantage de réflexions et de réfractions, ce qui réduit leur vitesse. L'augmentation du taux de **FM** et Dans la **figure IV.8**, l'effet de la forme du **FM** sur la vitesse de l'impulsion ultrasonore est montré, il est clair que la taille du **FM** joue un rôle important dans l'ajustement du comportement du matériau argileux sous l'influence des ultra-sons. À un rapport **FM** de 0 %, la vitesse de l'impulsion est égale à 2116,53 m/s. Mais au fur et à mesure que le rapport **FM** augmente, les différences deviennent apparentes. Par exemple, à 20 %, la vitesse d'impulsion pour le plus petit **FM** de 0,5×1 cm² est de 1 750,26 m/s, alors qu'elle est de 1 665,55 m/s pour le plus grand **FM** de 1×2 cm², ce qui indique que le plus grand **FM** entraîne une plus grande diminution de la vitesse d'impulsion. Cette diminution peut s'expliquer par le fait qu'un plus grand **FM** augmente la surface pouvant contenir des vides, ce qui améliore l'absorption des ultra-sons et entraîne une plus grande décélération. Plus la **FM** est grande, plus les ondes risquent d'interférer avec des obstacles physiques à l'intérieur de la brique, ce qui complique encore la trajectoire des ondes et entraîne une diminution de la vitesse. Ces résultats suggèrent que les briques avec des **FM** plus grands présentent une plus grande résistance à la transmission

des ultra-sons, ce qui peut être le résultat de l'influence accrue des vides internes et des changements dans la structure du matériau argileux.

IV.4.1.3 Absorption totale d'eau

Les résultats indiquent clairement que l'ajout de morceaux de masque facial dans les briques de terre entraîne une augmentation de l'absorption d'eau au fur et à mesure que le pourcentage de morceaux ajoutés augmente. À 0 % de **FM**, l'absorption d'eau est de 6,93 %, soit le taux le plus bas enregistré, ce qui indique que les briques de terre non modifiées sont plus résistantes à l'absorption d'eau. Cependant, une fois que 5% de pièces **FM** de 0,5 x 1 cm² sont ajoutées, le taux d'absorption d'eau passe à 9,26%, soit une augmentation de 33,62% par rapport aux briques non modifiées. Pour les briques avec 5% de pièces **FM** de 1×2 cm², l'absorption d'eau était de 11,68%, soit une augmentation de 68,54%. Cette augmentation se poursuit clairement avec l'augmentation du pourcentage de **FM**, comme le montre la [figure IV.9](#),

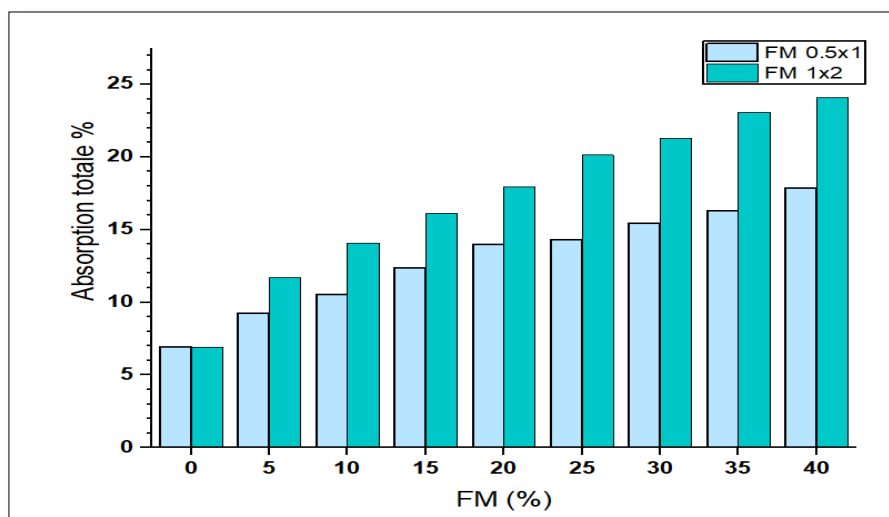


Figure IV.9 Variation de l'absorption totale en fonction de FM

Pour atteindre 17,87 % et 24,07 % lorsqu'on ajoute 40 % des morceaux de 0,5×1 cm² et de 1×2 cm², respectivement, ce qui signifie que le pourcentage d'absorption d'eau augmente avec l'augmentation du pourcentage de **FM** ajouté dans les deux cas. Cette corrélation peut s'expliquer par l'augmentation de la porosité des briques lors de l'ajout de morceaux de **FM**, car le **FM** de parement est souvent constitué de matériaux polymères légers ou de fibres synthétiques qui ne se combinent pas facilement avec les matériaux argileux, laissant de petits vides lorsqu'ils sont mélangés à l'argile. Ces vides ou pores deviennent des voies ouvertes qui permettent à l'eau de s'infiltrer plus rapidement et plus profondément dans les briques. En plus de l'effet du ratio **FM**, la forme des morceaux de **FM** a un effet évident sur le comportement d'absorption d'eau des briques de terre cuite. Les données montrent que l'utilisation de morceaux

plus grands ($1 \times 2 \text{ cm}^2$) augmente de manière significative le taux d'absorption d'eau par rapport à l'utilisation de morceaux plus petits ($0,5 \times 1 \text{ cm}^2$) au même ratio. Par exemple, à 10 % de **FM**, le taux d'absorption d'eau pour les briques avec des morceaux de $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ est d'environ 10,54 %, alors qu'il passe à 14,10 % pour les briques avec des morceaux de $1 \times 2 \text{ cm}^2$, ce qui représente une différence de 33,77 %.

L'écart d'absorption d'eau augmente avec le ratio **FM**, les briques fabriquées avec de gros morceaux de **FM** atteignant 24,07 % d'absorption à 40 %, contre 17,87 % pour les briques fabriquées avec de petits morceaux de **FM**, ce qui représente une différence de 34,70 %. Des recherches antérieures menées par Siva Avudaiappan sur des échantillons de béton ont également indiqué que les gros morceaux de **FM** contribuent à une plus grande absorption d'eau que les petits morceaux [111]. Cela indique que les gros morceaux créent des espaces et des vides plus importants dans le matériau argileux, ce qui augmente la quantité d'eau que les briques peuvent stocker.

IV.4.2 Effet des déchets de masques sur les propriétés mécaniques

IV.4.2.1 Résistance à la compression

Les propriétés mécaniques des briques de terre jouent un rôle crucial dans la détermination de leur qualité et de leur utilisation dans la construction, à l'instar d'autres matériaux de construction. Les **figure IV.10** montrent l'effet de l'ajout de morceaux de **FM** médical de différentes dimensions de $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ et $1 \times 2 \text{ cm}^2$ et de proportions allant de 0 à 40 % sur les propriétés mécaniques des briques d'argile, y compris la résistance à la compression, le module d'élasticité et la contrainte de rupture. Les courbes obtenues indiquent que le comportement de la résistance à la compression peut être divisé en deux phases distinctes :

Dans la première phase, la résistance à la compression augmente presque linéairement, reflétant l'élasticité du matériau et sa capacité à supporter des charges efficacement, jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale. Après ce point critique, la résistance à la compression commence à diminuer progressivement, indiquant que le matériau perd sa capacité à résister aux charges, jusqu'à la rupture finale. La déformation est très importante et c'est ce que l'on appelle l'élasticité du matériau. L'incorporation de pièces de **FM** de parement dans les briques de terre peut leur conférer une certaine plasticité, mais celle-ci varie en fonction des proportions et des dimensions de ces pièces. La **figure IV.11** montre clairement que même après l'effondrement de l'échantillon, ceci est resté dans un état de cohésion presque totale, ce qui est dû à la présence des pièces **FM** de parement qui lui ont donné une grande cohésion et une sorte de positivité.

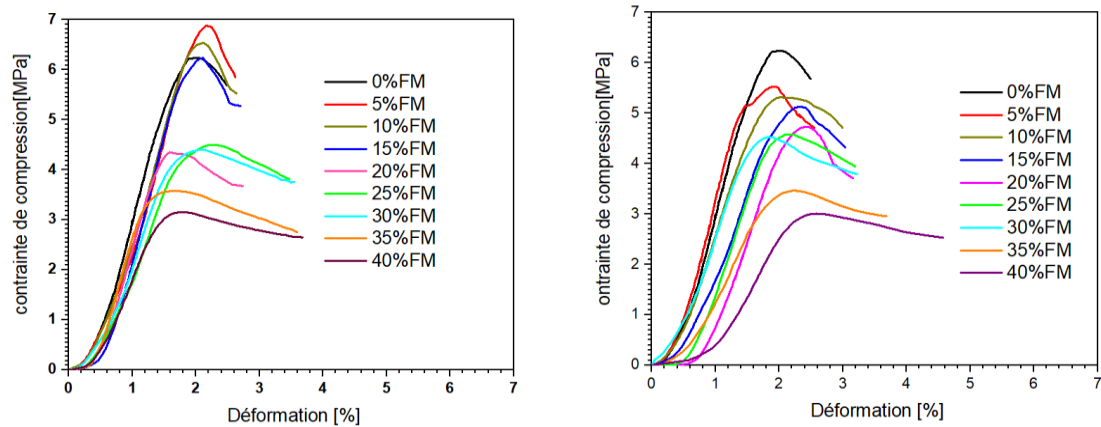


Figure IV.10 Effet de la teneur en FM sur le comportement mécanique en compression : (a) FM 0,5x1cm², (b) FM 1x2cm²



Figure IV.11. Effet de la coupe FM sur la cohésion de la brique de terre

L'analyse du [tableau IV 3](#) et de la [figure IV.12](#) montre clairement qu'il existe des effets notables et des différences significatives dans le comportement des briques de terre en fonction de la taille et de la proportion des pièces **FM**. Les données montrent que les morceaux de **FM** de plus petites dimensions (0,5×1 cm²) sont plus performants en termes de résistance à la compression que les morceaux plus grands (1×2 cm²). Avec 0 % de **FM**, la résistance à la compression des briques de terre était de 6,24 MPa.

Cependant, lorsque 5% de FM ont été ajoutés, la résistance à la compression des briques avec de petits morceaux de **FM** a augmenté à 6,89 MPa ou 10,59% comme c'était le cas pour le comportement des morceaux de FM dans le béton [150], tandis que la résistance à la compression des briques avec de grands morceaux de **FM** a diminué à 5,44 MPa ou 12,68%. Cela indique que les petites dimensions des morceaux de **FM** fournissent un support supplémentaire pour les briques et une distribution appropriée des fibres dans la matrice de la brique de terre [151], ce qui réduit les microfissures et, par conséquent, les fissures ont besoin

de plus de contraintes pour se propager dans la matrice, ce qui améliore la résistance à la compression dans les phases initiales. Lorsque la proportion de morceaux de **FM** augmente à 10 % et 15 %, les briques avec des morceaux de **FM** plus petits continuent à être plus performantes, la résistance à la compression de ce type étant de 6,54 MPa et 6,24 MPa respectivement, tandis que la résistance à la compression des briques avec des morceaux de **FM** plus grands se situe entre 5,39 et 5,13 MPa. Cela montre que les petites pièces **FM** sont capables de répartir les charges de manière plus efficace et plus homogène, ce qui confère aux briques une plus grande résistance.

Tableau IV.3 Paramètres mécaniques de compression du FM

FM %	0.5x1cm² pièces de masque			1x2 cm² pièces de masque		
	Résistance maximale (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Déformation ultime moyenne (%)	Résistance maximale (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Déformation ultime moyenne (%)
0*	6.24	273.00	2.02	6.24	273.00	2.02
5	6.89	287.00	2.16	5.44	318.03	1.88
10	6.54	331.26	2.11	5.39	388.73	2.16
15	6.24	356.98	2.12	5.13	255.91	2.36
20	4.35	286.98	1.59	4.58	249.62	2.00
25	4.14	200.10	1.90	4.55	229.50	1.79
30	4.06	181.51	1.83	4.49	191.45	1.78
35	3.58	158.29	1.66	3.52	166.39	2.40
40	3.15	156.10	1.78	2.84	165.02	2.67
* Mélange de références						

Cependant, à 20 % des pièces **FM**, nous observons une diminution significative de la résistance à la compression des briques avec de petites pièces **FM**, la résistance chutant à 4,35 MPa. En revanche, la résistance à la compression des briques contenant les plus gros morceaux de **FM** était de 4,58 MPa, soit presque le même niveau de résistance que les briques contenant les plus petits morceaux. Cette diminution suggère que l'augmentation de la proportion de morceaux de **FM** peut avoir des effets négatifs, en augmentant la porosité et en affaiblissant la structure interne de la brique, réduisant ainsi sa capacité à résister aux contraintes. À des pourcentages plus élevés, de 25 % à 40 %, les données montrent une diminution continue de la résistance à la compression pour les deux types de briques.

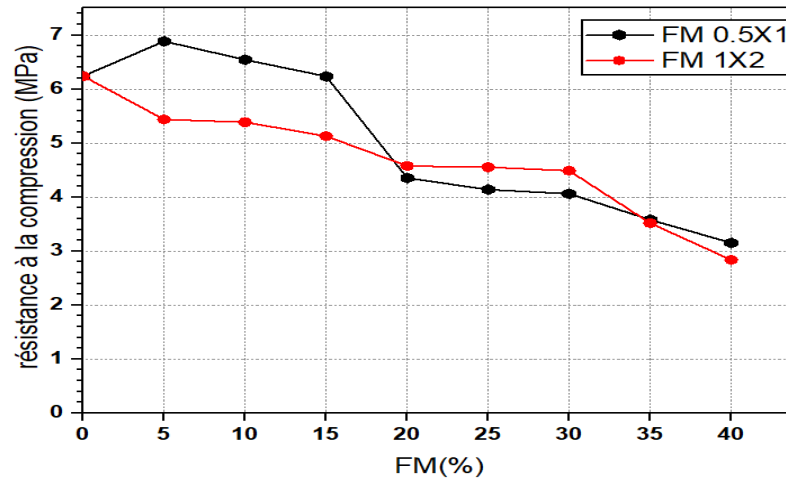


Figure IV.12. Effet de la teneur en FM sur la résistance à la compression

La résistance à la compression des briques contenant de petits morceaux de **FM** à 40 % était de 3,15 MPa, tandis que la résistance des briques contenant de plus gros morceaux était de 2,84 MPa. Cela indique que l'effet des morceaux de **FM** devient plus prononcé et négatif à mesure que la proportion augmente, ce qui entraîne une détérioration des performances mécaniques de la brique. Il est probable que l'augmentation du ratio **FM** augmente le nombre de vides dans la brique, ce qui affaiblit la cohésion interne et rend la brique moins résistante à la compression. Malgré la réduction significative de la résistance à la compression à 40 % dans les deux cas, les valeurs sont encore utilisables dans la maçonnerie, conformément à la norme Mexcoa qui fixe la résistance minimale à la compression à 2 MPa [41] et à la norme néo-zélandaise NZS 4298 pour les matériaux argileux qui fixe le minimum à 1,3 MPa [152].

La norme turque (Ankara, 1985 TS 2514) exige également une valeur minimale de Rcs de 1MPa.[153].

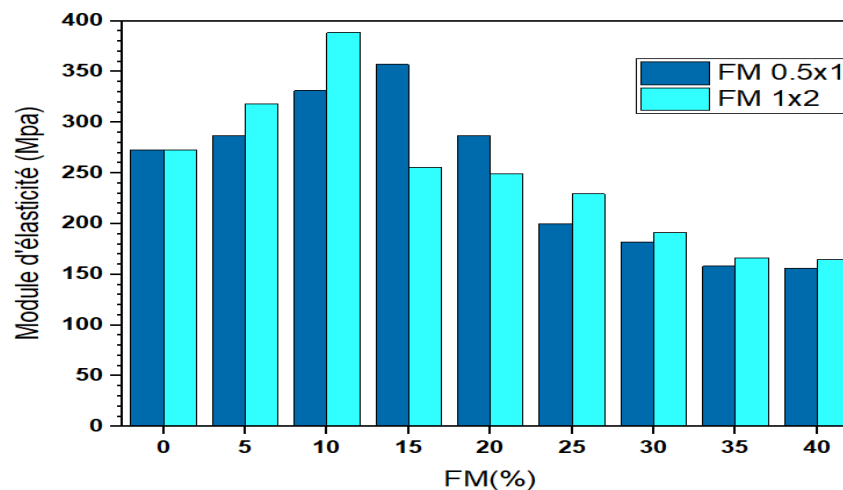


Figure IV.13. Module d'élasticité de la fonction FM

Pour ce qui est du module d'Young, les données présentées dans le [tableau IV 3](#) et la [figure IV.13](#) montrent que les briques avec les pièces FM plus grandes présentaient initialement un module d'Young plus élevé que les briques avec les pièces FM plus petites. À 5 %, le module de Young des briques avec les plus grands morceaux a augmenté pour atteindre 318,03, alors qu'il était de 287 pour les briques avec les plus petits morceaux. Cela suggère que les pièces plus grandes peuvent fournir une sorte de résistance initiale aux déformations. À 10 %, le module d'Young des briques contenant les plus gros morceaux de FM atteint 388,73, le niveau le plus élevé jamais enregistré, tandis que les briques contenant les plus petits morceaux présentent également une augmentation significative du module d'Young, avec 331,26. Cependant, après ce point, nous observons une baisse significative du module d'Young pour les briques contenant des pièces plus grandes. À 15 %, le module d'Young des briques à gros blocs tombe à 255,91, tandis que celui des briques à petits blocs continue d'augmenter jusqu'à 356,98. Cette diminution reflète l'effet de l'augmentation du rapport **FM**, car les coupes commencent à réduire la cohésion interne des briques, ce qui les rend moins rigides et plus susceptibles de se fissurer. À 20 %, le module de Young des briques à gros blocs continue de diminuer pour atteindre 249,62 et celui des briques à petits blocs 286,98. Au fur et à mesure que le pourcentage de coupes **FM** augmente, le module de Young continue à diminuer jusqu'à atteindre son point le plus bas à 40 %. Avec ce rapport, le module d'Young des briques de petite taille est de 156,10, tandis que celui des briques de grande taille est de 165,02. Cette chute brutale montre que l'augmentation des pièces **FM** entraîne une nette détérioration de l'élasticité de la brique, car la capacité de la brique à supporter des déformations élastiques est affaiblie.

IV.4.2.2 Résistance à la flexion

Après le durcissement, les résultats des tests sur les spécimens de brique de terre contenant des morceaux de masque de visage ont généralement montré une amélioration initiale de la résistance à la flexion par rapport au spécimen de contrôle, comme le montrent le [tableau IV 4](#) et la [figure IV.14](#). Les résultats indiquent que les briques de terre contenant des morceaux de **FM** présentent de meilleures propriétés que le mélange conventionnel dans les phases initiales, mais que la performance diminue progressivement au fur et à mesure que la teneur en morceaux de **FM** augmente. Ces résultats sont cohérents avec des études antérieures qui ont montré que les fibres de polypropylène présentaient un comportement similaire dans le béton au cours des premières étapes [154]. Dans le cas des briques contenant des petits morceaux de 0,5 x 1 cm², la résistance à la flexion commence à 3,408 MPa à 0 %, c'est-à-dire sans additifs, ce qui reflète la nature originale des briques de terre non renforcées. Avec l'introduction de 5 % de petits morceaux **FM**, nous observons une amélioration de la résistance à la flexion qui atteint 3,648

MPa, ce qui indique que ce pourcentage de morceaux améliore la bonne liaison et la cohésion entre les particules d'argile et renforce la résistance globale à la flexion des briques. Cet effet d'amélioration se poursuit pour atteindre sa valeur maximale à 10 %, où la résistance à la flexion est de 3,872 MPa. Cette augmentation de la résistance indique que les petits morceaux améliorent la distribution des contraintes à l'intérieur de la brique, fournissant des points d'appui supplémentaires qui améliorent sa résistance à la flexion. Toutefois, au-delà de 10 %, la résistance à la flexion commence à diminuer progressivement. À 15 %, la résistance tombe à 3,657 MPa et continue à diminuer à mesure que le pourcentage augmente à 20 % et 25 %, atteignant 3,524 MPa et 3,044 MPa, respectivement. Cette diminution continue peut s'expliquer par le fait que les morceaux, lorsqu'ils sont ajoutés en grandes proportions, peuvent avoir des effets négatifs sur la cohésion du matériau, car ils peuvent créer des fissures ou des lacunes internes qui réduisent la cohésion des particules, en plus de l'agrégation dense des morceaux de **FM** qui empêche la liaison entre la matrice de brique de terre et les morceaux. Il est entendu que le dépassement d'un certain pourcentage de coupe entraîne des contraintes internes inhomogènes qui augmentent la fragilité des briques et réduisent leur résistance à l'usure. La capacité à résister aux forces extérieures. À 40 %, la résistance à la flexion est considérablement réduite à 2,390 MPa, ce qui reflète clairement l'impact négatif de l'insertion excessive de petits morceaux. De même, nous observons un schéma similaire pour les briques contenant des morceaux plus grands de $1 \times 2 \text{ cm}^2$, où la résistance à la flexion commence à 3,408 MPa à 0 %, et s'améliore de manière significative à 5 % pour atteindre 3,742 MPa. À ce stade, il est clair que les morceaux plus grands jouent le même rôle que les plus petits dans l'amélioration de la résistance mécanique des briques, en fournissant un support supplémentaire pour la liaison interne des particules. La résistance continue d'augmenter à 10 % pour atteindre 3,844 MPa, reflétant le même comportement que précédemment avec les petits morceaux, les gros morceaux montrent également leur efficacité dans l'amélioration de la résistance mécanique des briques à des pourcentages modérés. Cependant, comme pour les petits morceaux, la résistance à la flexion commence à diminuer lorsque les proportions de morceaux augmentent après 10 %. À 15 %, la résistance chute à 3,633 MPa, puis continue à diminuer à 20 % et 25 % pour atteindre 3,526 et 3,135 MPa, respectivement. À 40 %, la résistance la plus faible jamais enregistrée est de 1,939 MPa, ce qui confirme que les gros morceaux, comme les petits morceaux, deviennent nuisibles lorsqu'ils sont ajoutés en très grandes quantités, entraînant la désintégration de la structure interne des briques et les rendant plus susceptibles de se fissurer et de s'effondrer sous l'effet des forces.

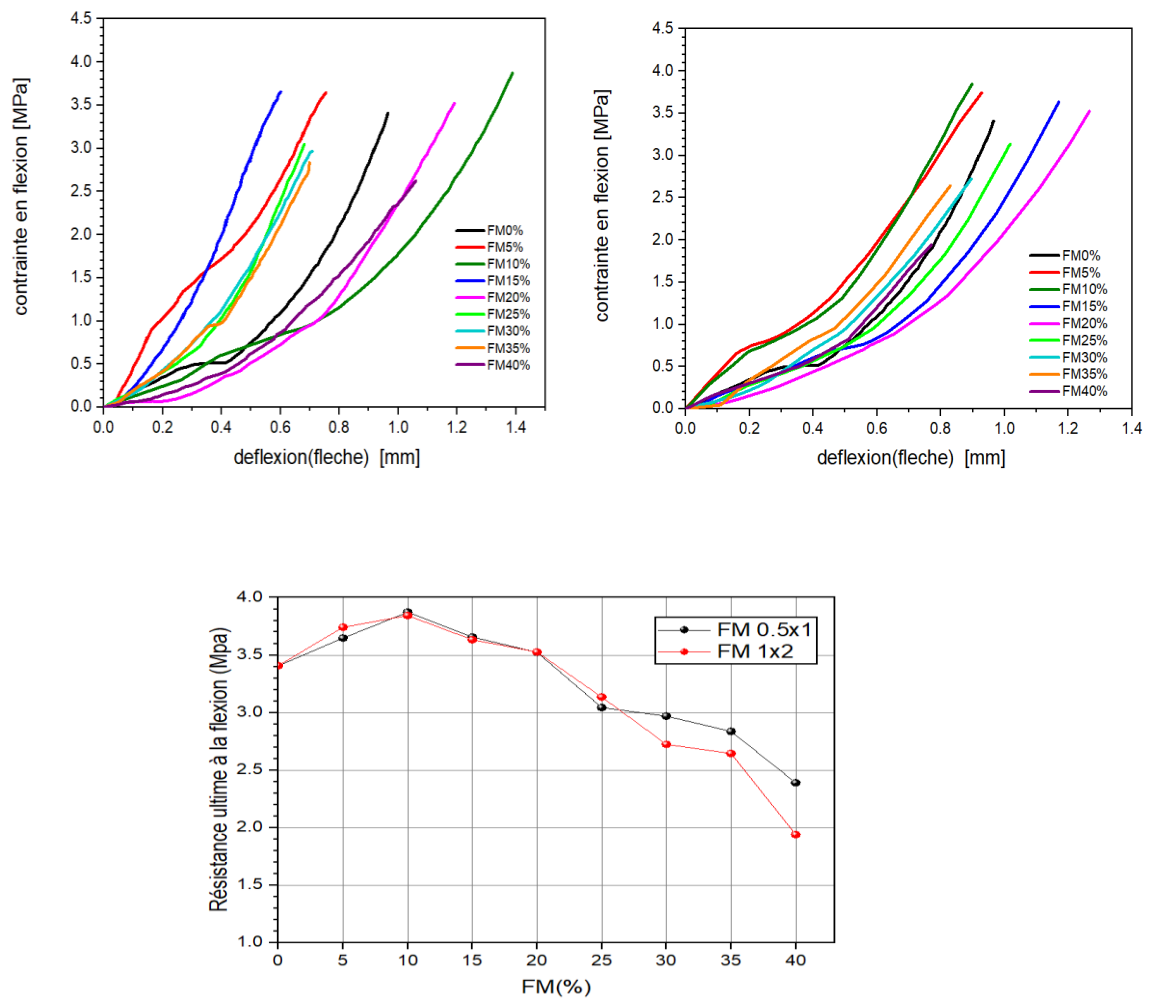


Figure IV.14 Résistance à la flexion en fonction de FM (a) FM 0,5x1cm², (b) FM 1x2cm² (c) Résistance maximale à la flexion

Tableau IV.4 Paramètres mécaniques en flexion de FM

FM %	0.5x1cm ² pièces de masque			1x2 cm ² pièces de masque		
	Flexural (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Déflexion ultime (%)	Flexural (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Déflexion ultime (mm)
0*	3.41	184.30	0.97	3.41	184.30	0.97
5	3.65	229.88	0.75	3.74	234.86	0.93
10	3.87	86.03	1.39	3.84	197.49	0.90
15	3.66	78.85	0.60	3.63	85.83	1.17
20	3.52	74.42	1.19	3.53	84.57	1.27
25	3.04	81.13	0.68	3.14	82.86	1.02
30	2.97	70.20	0.71	2.72	78.65	0.89
35	2.84	69.48	0.69	2.64	76.22	0.83
40	2.39	30.79	1.00	1.94	59.65	0.77

* Mix of Reference

D'autre part, le module de Young, qui mesure la dureté d'un matériau et sa capacité à résister à la déformation, présente un schéma similaire d'amélioration et de diminution avec l'augmentation des pourcentages de morceaux. Dans le cas des briques contenant de petits morceaux, le module d'Young commence à 184 300 MPa à 0 %, comme le montrent la [figure 5.15](#) et le [tableau 4](#).

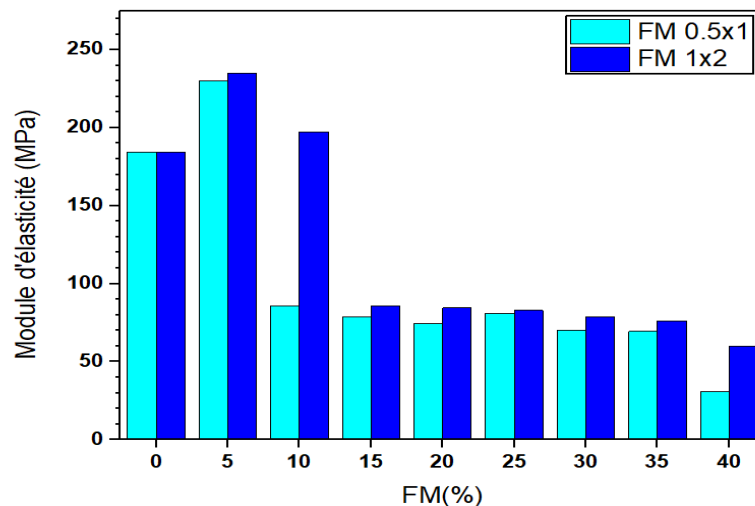


Figure IV.15 modules élastiques en flexion de FM

Lorsque l'on ajoute 5 %, on observe une amélioration significative, le coefficient passant à 229,883 MPa, ce qui indique que les petits morceaux renforcent la rigidité de la brique, réduisant ainsi la possibilité qu'elle se déforme sous l'effet des charges. Cela implique que les blocs agissent comme des facteurs de soutien supplémentaires dans la microstructure de la brique, la rendant plus résistante aux déformations élastiques. Lorsque les proportions augmentent jusqu'à 10 %, on observe une forte diminution du module d'Young à 86,031 MPa, ce qui indique que l'augmentation du rapport dans cette mesure a des effets négatifs sur la rigidité de la brique. À des ratios plus élevés, tels que 15 % et 20 %, la diminution se poursuit jusqu'à 78,846 et 74,423 MPa, respectivement. Le module atteint sa valeur la plus basse de 30,795 MPa à 40 %.

Pour les briques comportant des pièces de dimensions plus importantes, le module de Young présente également une tendance à l'amélioration initiale, puis à la diminution au fur et à mesure que les pourcentages de pièces augmentent. À 0 %, le module est de 184,300 MPa, passant à 234,855 MPa à 5 %. Cette amélioration indique que les grandes coupes apportent initialement une augmentation significative de la dureté, mais que cet effet ne persiste pas à mesure que les taux de coupe augmentent. Sur la base de ces résultats, on peut conclure que l'introduction de morceaux de **FM** dans les briques de terre peut être bénéfique pour l'amélioration des propriétés mécaniques des briques lorsqu'ils sont utilisés dans de faibles proportions (environ 5%-10%). Dans ces proportions, les morceaux améliorent la résistance à

la flexion et le module d'Young de la brique, la rendant plus apte à résister aux contraintes mécaniques et moins sujette à l'usure. Déformation. Toutefois, lorsque ces pourcentages sont dépassés, les débris commencent à provoquer des perturbations internes dans la microstructure de la brique, ce qui entraîne une baisse des performances mécaniques et une diminution de la résistance à la flexion et de la rigidité de la brique. Par conséquent, on peut dire que l'utilisation optimale des débris nécessite une certaine prudence dans les ratios d'insertion afin d'éviter les effets négatifs qui peuvent résulter d'une surutilisation.

IV.4.3 Effet des déchets de masques sur les propriétés thermiques

IV.4.3.1 Conductivité thermique (CT)

La conductivité thermique se définit comme tant une propriété physique qui se réfère à la capacité d'un matériau à transférer la chaleur à travers lui. Elle est mesurée comme le taux de transfert de chaleur à travers un matériau en fonction de la surface et du temps, la température étant différente. Les matériaux à forte CT, tels que les métaux, transfèrent rapidement la chaleur, tandis que les matériaux à faible CT, tels que les isolants, ralentissent le transfert de la chaleur. Les résultats de l'étude mettent clairement en évidence l'effet de l'ajout de morceaux de **FM** sur les propriétés thermiques des briques d'argile, puisque les expériences ont été menées en utilisant deux types de morceaux de **FM** de dimensions différentes ; le premier avec des dimensions de $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ et le second avec des dimensions de $1 \times 2 \text{ cm}^2$, avec des pourcentages variables de **FM** allant de 0 % à 40 %.

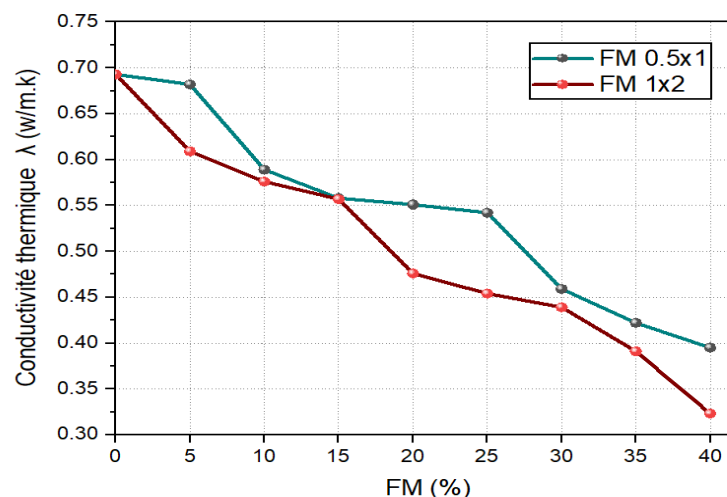


Figure IV.16. Conductivité thermique en fonction FM

La **figure IV.16** montre clairement que le TC des briques diminue progressivement avec l'augmentation du pourcentage de **FM** ajouté. Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes qui ont montré que les morceaux de **FM** présentaient un comportement similaire

dans le béton [150], ce qui indique que le **FM** améliore la propriété d'isolation thermique des briques d'argile. À 5 % de **FM**, les briques à petite coupe ont enregistré un CT de 0,682 W/m.k, tandis que les briques à grande coupe ont montré une amélioration encore plus importante avec un CT de 0,609 W/m.k. Cela suggère que l'augmentation de la zone de coupe est plus efficace pour réduire le CT. Lorsque le rapport **FM** est passé à 10 % et 15 %, la diminution du coefficient de température s'est poursuivie pour les deux types de briques. Par exemple, à 10 %, le CT a diminué à 0,589 W/m. k pour les briques de petite taille, tandis qu'il a diminué à 0,576 W/m. k pour les briques de grande taille. La tendance continue à la baisse de la CT indique que plus il y a de vides, plus la CT est faible [155]. Boumhaout a également noté que les vides sont généralement remplis d'air, ce qui indique une diminution du CT [156]. En effet, l'air est un isolant thermique efficace qui réduit la capacité du matériau à transférer la chaleur. Ces vides agissent comme des isolants thermiques naturels, limitant le transfert de chaleur à travers le matériau et améliorant l'efficacité de l'isolation thermique de la brique. À 20 % du **FM**, les briques avec de petits morceaux ont enregistré un TC de 0,551 W/m. k, tandis que les briques avec de grands morceaux ont enregistré 0,476 W/m. k, ce qui montre que les grands morceaux continuent d'offrir une meilleure performance thermique, car ils réduisent le TC de manière plus efficace. Ces résultats indiquent que les gros morceaux créent de plus grands espaces d'air ou des voies thermiques plus complexes, augmentant la résistance au transfert de chaleur à travers le matériau argileux. Lorsque le pourcentage de **FM** continue d'augmenter jusqu'à 25 % et 30 %, nous constatons que les briques avec de petites pièces montrent une diminution progressive de la CT à 0,459 W/m. k à 30 %, tandis que les briques avec de grandes pièces montrent 0,439 W/m. k au même pourcentage. Ces diminutions montrent que non seulement l'ajout de **FM** affecte positivement le niveau d'isolation thermique, mais aussi que les briques de plus grande taille ont un impact positif sur l'isolation thermique. Les pièces **FM** semblent améliorer cette propriété de manière plus efficace. Les résultats les plus notables sont observés à 40 %, où les briques à petits blocs enregistrent une CT de 0,395 W/m. k, tandis que les briques à gros blocs enregistrent 0,323 W/m.k. En outre, les briques à gros blocs enregistrent 0,439 W/m.k. Cette diminution significative de la CT, en particulier pour les briques à gros morceaux, suggère qu'une limite d'efficacité plus élevée peut être atteinte en utilisant des pourcentages plus élevés de **FM**. La taille plus importante des morceaux entraîne une plus grande dispersion de la chaleur et réduit sa capacité à voyager à travers le matériau solide de la brique, ce qui améliore la performance thermique de la brique dans différentes conditions. Physiquement, cette amélioration de la performance thermique peut s'expliquer par la dispersion des voies de transfert de la chaleur dans la structure de la brique. Normalement, la chaleur est transférée à travers les solides principalement par conduction thermique directe entre les molécules. Mais

avec l'ajout de pièces **FM**, un certain nombre d'espaces d'air sont introduits et agissent comme un isolant naturel, allongeant et compliquant les chemins de transfert de la chaleur, réduisant la vitesse à laquelle la chaleur se propage à travers le matériau. Les pièces **FM**, en particulier celles de grande taille, créent un réseau complexe d'interstices et de chemins intermittents, ce qui augmente la résistance au transfert de la chaleur. Par conséquent, plus la proportion et la taille des **FM** plus les briques sont efficaces en termes d'isolation thermique. D'un point de vue microstructural, l'ajout de morceaux de **FM** entraîne des changements significatifs dans la structure interne des briques. La distribution irrégulière des **FM** entraîne la formation d'espaces aléatoires qui réduisent la densité de la brique, ce qui réduit sa capacité à transférer la chaleur par conduction. On sait que la densité d'un matériau est directement liée à sa capacité à transférer la chaleur, de sorte que la réduction de la densité des briques par l'introduction d'espaces d'air améliore l'efficacité de l'isolation thermique. Ceci est en accord avec les recherches qui ont étudié l'effet de la fibre de palme sur le TC des briques de terre [41,42]. Ces résultats confirment que des coupes plus importantes contribuent à la création de vides plus grands et plus efficaces pour réduire la densité du matériau et augmenter sa résistance à la conductivité thermique.

IV.4.3.2. Capacité thermique spécifique

La **figure IV.17** indique clairement l'effet de l'introduction de **FM** de différentes tailles sur la capacité thermique spécifique des briques d'argile. La capacité thermique est une propriété thermique importante qui reflète la capacité d'un matériau à stocker de l'énergie thermique et qui dépend principalement de la composition et de la structure physique du matériau. Dans le cas des briques de terre traditionnelles, nous observons que la capacité thermique spécifique des briques non masquées atteint 1 087,53 J/kg-K. Cette valeur reflète la capacité des briques de terre à stocker la chaleur en raison de leur composition minérale, qui contient un pourcentage élevé de métaux lourds et de substances naturelles qui améliorent la capacité des briques à absorber et à stocker l'énergie thermique. Au fur et à mesure que des pourcentages variables de **FM** sont introduits dans les briques d'argile, nous observons une diminution progressive de la capacité thermique spécifique des briques, ce qui indique que la présence de **FM** dans les briques affecte négativement leur capacité à retenir la chaleur. À 5 % de **FM**, la capacité thermique de la brique diminue à environ 1 055,85 J/kg-K pour les briques avec des morceaux de $0,5 \times 1 \text{ cm}^2$ et à 1 061,10 J/kg-K pour les briques avec des morceaux de $1 \times 2 \text{ cm}^2$. Cette légère diminution peut s'expliquer par le fait que les morceaux de **FM** isolent la chaleur par rapport à l'argile naturelle, réduisant ainsi la capacité globale des briques à stocker l'énergie thermique. Lorsque le pourcentage de **FM** passe à 10 %, cette diminution de la capacité thermique

s'accélère, atteignant 1013,23 J/kg-K pour les briques de petite taille et 1059,93 J/kg-K pour les briques de plus grande taille. Cette diminution reflète l'effet de l'augmentation de la quantité de MF dans la structure de la brique, car les MF sont constitués de matériaux à faible conductivité thermique par rapport à l'argile et agissent comme un facteur de réduction de la capacité calorifique des briques. À ce stade, nous observons que les briques contenant des morceaux plus grands conservent une capacité thermique légèrement supérieure à celle des briques contenant des morceaux plus petits, ce qui suggère que les dimensions plus grandes des morceaux peuvent contribuer à maintenir une structure thermique plus stable par rapport aux morceaux plus petits qui peuvent entraîner une distribution non uniforme de la chaleur. Enfin, au maximum de 40 %, nous observons une chute brutale de la capacité thermique à 697,20 J/kg-K pour les briques de petite taille et à 708,59 J/kg-K pour les briques de grande taille. Cette détérioration significative de la capacité thermique reflète la dominance du **FM** dans la structure de la brique

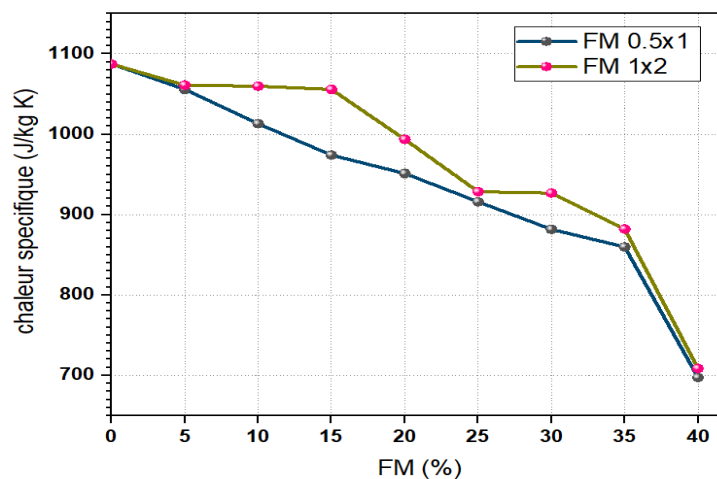


Figure IV.17 Effet de la teneur en FM sur la chaleur spécifique

IV.4.3.3 Effusivité thermique

L'effusivité thermique est un paramètre qui décrit la capacité d'un matériau à absorber et à échanger la chaleur avec son environnement lors d'un contact thermique [156]. Elle détermine la réactivité du matériau aux changements thermiques qui l'entourent. La **figure IV.18** montre l'effusivité thermique en fonction des proportions et de la forme des morceaux de MF, ce qui prouve que l'ajout de ces matériaux dans le mélange de briques affecte de manière significative son comportement thermique. Lorsque des matériaux tels que les morceaux de **FM** sont ajoutés aux briques, on observe un changement notable de cette propriété en raison de la nature isolante des morceaux de **FM**, qui limite la capacité de la brique à transférer la chaleur. Initialement,

l'effusivité thermique de la brique sans aucun additif était de $1105,20 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$, une valeur considérée comme appropriée pour les briques conventionnelles qui nécessitent une certaine efficacité de transfert de chaleur. Cette valeur sert de base pour comparer les effets de l'ajout de **FM** dans différentes proportions. Lorsque 5 % de morceaux de **FM** ont été ajoutés au mélange, l'effusivité thermique a diminué à $1061,27 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour les briques avec de petits morceaux ($0,5\times 2 \text{ cm}^2$) et à $1003,67 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour les briques avec de plus grands morceaux ($1\times 2 \text{ cm}^2$). Cette diminution initiale démontre l'effet immédiat de la présence de morceaux de **FM** dans le mélange, agissant comme un isolant et réduisant la capacité des briques à transférer la chaleur. Lorsque la proportion de morceaux de **FM** a augmenté jusqu'à 10 %, l'effusivité thermique a continué à diminuer, atteignant $956,04 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour les briques avec de petits morceaux et $964,36 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour les briques avec de gros morceaux. Cette diminution progressive reflète l'effet croissant de la coupe **FM** sur la structure des briques, car les coupes **FM** créent de petits vides dans la structure des briques, ce qui... réduit l'efficacité de la conduction thermique. Ces vides agissent comme des barrières qui réduisent le flux de chaleur, diminuant ainsi encore plus l'effusivité thermique. À des pourcentages plus élevés de **FM**, tels que 25 % et 30 %, les effets deviennent plus prononcés, l'effusivité thermique tombant à $759,58 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour les briques de petite taille et à $753,59 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour les briques de grande taille à 30 %. Cette diminution significative indique que les morceaux de **FM** sont devenus dominants dans la matrice de la brique, réduisant de manière significative la capacité de transfert de chaleur des briques. Enfin, à 40 % de **FM**, l'effusivité thermique atteint ses valeurs les plus basses, à savoir $615,98 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour les briques à petite coupe et $553,71 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-1/2}$ pour les briques à grande coupe. Cette réduction drastique de l'effusivité thermique reflète l'effet de la découpe **FM** sur les propriétés de la brique, car la découpe **FM** devient l'élément dominant de la composition et isole considérablement la brique des interactions thermiques avec le milieu environnant. Les pièces **FM**, avec leurs propriétés isolantes, sont principalement composées de polypropylène et d'un matériau tel que le polyester qui transforme les briques en un matériau à faible efficacité thermique.

Sur la base de ces résultats, il est clair que l'introduction de morceaux de **FM** dans les briques de terre réduit considérablement l'effusivité thermique. Cette propriété peut être utile dans certaines applications nécessitant une isolation thermique

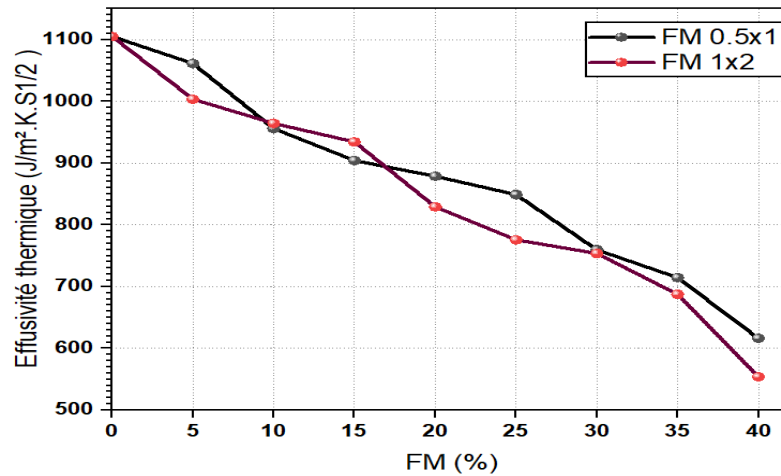


Figure IV.18 Effet de la teneur en FM sur l'effusivité thermique

IV.5 Conclusion

L'objectif de ce travail était d'étudier l'effet de l'introduction de déchets de masques médicaux recyclés, en différentes tailles et proportions, sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des briques d'argile. Les résultats des études expérimentales indiquent ce qui suit :

- La densité des briques de terre diminue progressivement à mesure que la proportion et la taille des morceaux de masques médicaux augmentent, en raison de la légèreté du matériau polymère et de la formation de vides internes non incorporés, ce qui accroît la porosité globale.
- L'absorption totale d'eau des briques augmente avec la teneur en masques médicaux, en raison de l'augmentation des vides et des pores ouverts et de la mauvaise liaison entre les granules d'argile et la matière plastique.
- La vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (UPV) diminue avec l'augmentation de la teneur en FM, ce qui reflète la diminution de la cohésion de la structure interne et l'augmentation des défauts et des vides à l'intérieur de la brique.
- La résistance à la compression et à la flexion montre une légère amélioration à de faibles pourcentages de FM en raison de son effet sur l'amélioration de la distribution des contraintes et la réduction des microfissures, mais elle diminue considérablement à des pourcentages élevés en raison de la faible adhérence entre l'argile et les polymères et de

l'absence d'interaction chimique entre eux, ce qui rend les briques moins aptes à supporter des charges mécaniques à des concentrations élevées.

- La conductivité thermique des briques diminue de manière significative lorsque le FM est introduit, ce qui améliore la propriété d'isolation thermique et les rend plus adaptées aux applications qui nécessitent un poids léger et une bonne isolation thermique.
- La capacité thermique spécifique et la conductivité thermique de la brique diminuent à mesure que la teneur en FM augmente, ce qui la rend moins apte à stocker ou à échanger de la chaleur avec l'environnement extérieur, ce qui renforce son efficacité en tant qu'élément isolant.
- La grande taille des blocs ($1 \times 2 \text{ cm}^2$) améliore l'isolation thermique par rapport aux petits blocs, mais nuit davantage aux propriétés mécaniques, ce qui nécessite la sélection d'une taille et d'un rapport optimaux pour équilibrer les performances mécaniques et thermiques.
- Sur la base de ces résultats, on peut dire que le recyclage de masques médicaux dans des brique de terre en faibles proportions peut améliorer certaines propriétés mécaniques tout en améliorant les performances thermiques, tandis que des proportions élevées entraînent une diminution de la résistance des briques et ne conviennent que pour des pièces non structurelles et des applications qui nécessitent une bonne isolation thermique et un poids léger.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion :

Cette étude s'inscrit dans le cadre des efforts scientifiques visant à valoriser les déchets médicaux, en particulier les masques chirurgicaux à usage unique, en les réintégrant dans le secteur des matériaux de construction pour atteindre deux dimensions complémentaires : la dimension environnementale de la réduction de la pollution plastique et la dimension technico-économique de la production de matériaux de construction innovants et durables. Dans ce travail, les briques de terre cuite ont été retenues comme élément clé en raison de leur utilisation répandue dans la construction traditionnelle mais surtout du fait de leur faible coût et de leur facilité de fabrication, tout en essayant d'améliorer leurs propriétés mécaniques et thermiques par le biais de deux phases principales interdépendantes.

Dans la première phase, l'accent a été mis sur la sélection de la meilleure qualité de sol local, du stabilisateur le plus approprié et de son rapport optimal, en étudiant le comportement de trois types de sols (A, B et C) avec deux stabilisateurs différents, la chaux et le ciment, dans des proportions allant de 2 % à 10 %. Les résultats ont montré que le sol A de la région de M'sila présentait la meilleure réponse au processus de stabilisation, avec la plus forte amélioration de la résistance à la compression et à la flexion lorsque 8 % de chaux étaient ajoutées, avec une diminution significative du taux d'absorption d'eau à ce taux, reflétant une meilleure stabilité structurelle par rapport aux autres échantillons.

La deuxième phase a consisté à étudier l'effet de l'introduction de déchets de masques médicaux recyclés dans différentes tailles et proportions dans des briques de terre pré-stabilisées et à analyser l'impact sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques. Les résultats ont montré que l'augmentation de la teneur en masques entraînait une diminution progressive de la densité apparente en raison de la légèreté du matériau polymère et de la formation de pores internes ainsi que le taux d'absorption d'eau augmentait en raison d'une porosité ouverte accrue et d'une mauvaise liaison entre les granules d'argile et les fibres plastiques. On a également observé une diminution de la vitesse ultrasonique, signe d'une structure interne affaiblie, mais aussi une diminution significative de la résistance à la compression et à la flexion pour des rapports et des volumes importants.

En revanche, l'introduction de masques médicaux a eu un effet positif sur les propriétés thermiques des briques, puisque la conductivité thermique et la capacité thermique spécifique ont diminué, augmentant ainsi leur capacité d'isolation thermique et leur légèreté. Les résultats ont également montré que les briques de grande taille ($1 \times 2 \text{ cm}^2$) amélioraient davantage l'isolation thermique que les briques de petite taille, mais

avaient un impact plus important sur les performances mécaniques, ce qui montre qu'il est nécessaire de trouver un équilibre entre la taille et le rapport pour obtenir de bonnes propriétés thermiques sans détérioration significative de la durabilité. Ces résultats soulignent la possibilité d'incorporer des déchets de masques médicaux dans des briques de terre pour produire un matériau de construction plus léger et plus isolant sur le plan thermique, mais moins tolérant aux charges mécaniques, ce qui le rend plus adapté aux applications non structurelles qui nécessitent de bonnes propriétés d'isolation et minimisent la consommation de ressources conventionnelles.

Recommandations et perspectives

En conclusion, cette étude a permis de mettre en évidence des possibilités des travaux supplémentaires dans le domaine de la valorisation des déchets dans les matériaux de construction, y compris :

- L'étude de la résistance à la traction des échantillons de brique de terre contenant des déchets de masques médicaux ou des fibres polymères similaires telles que les fibres PET.
- Réaliser une étude comparative entre les brique de terre renforcées par des fibres de masque médical et d'autres types de fibres polymères ou naturelles afin d'évaluer les différences de propriétés mécaniques et thermiques.
- Analyser l'effet des hautes et basses températures sur le comportement des brique de terre contenant des déchets polymères, et étudier la stabilité de leurs propriétés thermiques et mécaniques dans différentes conditions climatiques.
- Réaliser une série d'essais de durabilité à long terme tels que la perméabilité, la carbonatation, les cycles de gel-dégel, l'impact de l'humidité et l'altération naturelle, afin de garantir la performance durable de ce type de brique.
- Explorer l'incorporation d'autres types de déchets plastiques et médicaux dans les brique de terre afin d'accroître leur valorisation et de minimiser la pollution de l'environnement.

Références bibliographiques

- [1] J. Ammendolia, J. Saturno, A. L. Brooks, S. Jacobs, and J. R. Jambeck, “Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID- 19 . The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect , the company ’ s public news and information ,” no. January, 2020.
- [2] M. Idrees, A. Akbar, A. M. Mohamed, D. Fathi, and F. Saeed, “Recycling of Waste Facial Masks as a Construction Material, a Step towards Sustainability,” *Materials (Basel)*., vol. 15, no. 5, pp. 1–13, 2022, doi: 10.3390/ma15051810.
- [3] T. A. Aragaw, “Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 159, no. June, p. 111517, 2020, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111517.
- [4] A. Emery, “UCLA UCLA Encyclopedia of Egyptology Title Mud-Brick Architecture Permalink <https://escholarship.org/uc/item/4983w678> Journal UCLA Encyclopedia of Publication Date Copyright Information,” 2011, [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/4983w678>
- [5] B. Kadim and H. Hnaihen, “The Appearance of Bricks in Ancient Mesopotamia ago , people lived in caves in northern Iraq and used stones for the manufacture of Sulaymaniyah city . 1 The dimensions of one of the well-known caves " Shanider " in Hnaihen : The Appearance of Bricks in A,” vol. 6, no. 1, pp. 73–96, 2020.
- [6] M. S. El-Mahllawy and A. M. Kandeel, “Engineering and mineralogical characteristics of stabilized unfired montmorillonitic clay bricks,” *HBRC J.*, vol. 10, no. 1, pp. 82–91, 2014, doi: 10.1016/j.hbrcj.2013.08.009.
- [7] Y. Luo, M. Yang, P. Ni, X. Peng, and X. Yuan, “Degradation of rammed earth under wind-driven rain: The case of Fujian Tulou, China,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 261, p. 119989, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119989.
- [8] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 512–519, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.
- [9] C. C. Lamberg-Karlovsky, “Ancient Mesopotamia: The Eden That Never Was,” *Am. Anthropol.*, vol. 103, no. 1, pp. 226–228, 2001, doi: 10.1525/aa.2001.103.1.226.

- [10] M. A. Martin-Antunes, E. Prieto, B. Garcia, C. Perlot, and A. Seco, “A Methodology to Optimize Natural By-Product Mixes for Rammed Earth Construction Based on the Taguchi Method,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 22, pp. 0–13, 2024, doi: 10.3390/app142210431.
- [11] I. Zaghez, R. Attoui, and B. N. Saou-Dufrêne, “Reviving the Urban Heritage of the Algerian Sahara: Restoration and Sustainability of Earthen Architecture in Ksar Khanguet Sidi Nadji as a Case Study,” *Archaeologies*, vol. 20, no. 2, pp. 481–518, 2024, doi: 10.1007/s11759-024-09501-z.
- [12] A. Overview and E. A. Conservation, “Terra Literature Review”.
- [13] H. Niroumand, M. F. M. Zain, and M. Jamil, “Assessing of Critical Parametrs on Earth Architecture and Earth Buildings as a Vernacular and Sustainable Architecture in Various Countries,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 89, pp. 248–260, 2013, doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.843.
- [14] V. Maniatidis and P. Walker, “A review of rammed earth construction,” *Dev. rammed earth UK Hous.*, no. May, p. 109, 2003, [Online]. Available: <http://staff.bath.ac.uk/abspw/rammedearth/review.pdf>
- [15] M. C. J. Delgado and I. C. Guerrero, “Earth building in Spain,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 9, pp. 679–690, 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.006.
- [16] Analysis of the Hygrothermal Functional Properties of Stabilised Rammed Earth Materials vol. 17, p. 302, 1385.
- [17] M. Stroz and G. Shakhmenko, “USE OF STRAW – CLAY MATERIAL IN WALLS,” pp. 84–90, 2006.
- [18] M. J. E. Aubert, “Formulation et caractérisation d ’ un composite terre-fibres végétales : la bauge Tuan Anh Phung To cite this version : HAL Id : tel-01938827 Formulation et caractérisation d ’ un composite terre-fibres végétales : la bauge Présentée et soutenue par Tuan ,” 2018.
- [19] M. Bouhicha, F. Aouissi, and S. Kenai, “Performance of composite soil reinforced with barley straw,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 617–621, 2005, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013.
- [20] S. Ramakrishnan, S. Loganayagan, G. Kowshika, C. Ramprakash, and M. Aruneshwaran, “Adobe blocks reinforced with natural fibres: A review,” *Mater.*

- Today Proc.*, vol. 45, no. xxxx, pp. 6493–6499, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.377.
- [21] H. Guillaud, T. Joffroy, P. Odul, and CRATerre-EAG, *Compressed Earth Blocks-Manual of Design and Construction: Volume II*. 1995.
- [22] P. M. Touré, V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, and D. Azilinson, “Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB),” *J. Build. Eng.*, vol. 13, no. August, pp. 266–271, 2017, doi: 10.1016/j.jobbe.2017.08.012.
- [23] D. H. Green, G. Thompson, M. M. Leighton, and R. E. Grim, “State of Illinois Department of Registration and Education Frank Modern Concepts of Clay Materials C[^] Printed By Authority of the State of Illinois Urbana, Illinois 1942,” *J. Geol.*, vol. L, no. 3, 1942.
- [24] B. Lanson, “X-ray diffraction identification of clay minerals: improvements induced by numerical data processing,” no. January 1995, 2018.
- [25] J. C. Miranda-Trevino and C. A. Coles, “Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 23, no. 1–4, pp. 133–139, 2003, doi: 10.1016/S0169-1317(03)00095-4.
- [26] M. E. Awad, A. López-Galindo, M. Setti, M. M. El-Rahmany, and C. V. Iborra, “Kaolinite in pharmaceuticals and biomedicine,” *Int. J. Pharm.*, vol. 533, no. 1, pp. 34–48, 2017, doi: 10.1016/j.ijpharm.2017.09.056.
- [27] P. Kamgang-Syapnjeu, “Membranes céramiques à base d’argiles kaolinitiques, de coques de noix de coco et de coquilles d ’ œufs : Elaboration , caractérisation et mise en œuvre pour la désinfection des eaux destinées à la consommation.,” *Thèse Dr. l’Université Yaoundé I*, no. October, p. 152, 2022.
- [28] T. Al-Ani and O. Sarapää, “Clay and clay mineralogy,” *Geochemical Surv. Finl.*, no. January 2008, pp. 1–94, 2008, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/292706105_Clay_and_clay_mineralogy
- [29] “تأثير المعالجة الكيميائية علي الخصائص الميكانيكية لمركب مقوي باليااف نباتية وذو أساس من مادة غير عضوية-قوادري زينات2019/2020
- [30] I. Bibi, J. Icenhower, N. K. Niazi, T. Naz, M. Shahid, and S. Bashir, *Clay Minerals: Structure, Chemistry, and Significance in Contaminated Environments and*

- Geological CO2 Sequestration*. Elsevier Inc., 2016. doi: 10.1016/B978-0-12-803837-6.00021-4.
- [31] M. R. Hall, K. B. Najim, and P. Keikhaei Dehdezi, "Soil stabilisation and earth construction: Materials, properties and techniques," *Mod. Earth Build. Mater. Eng. Constr. Appl.*, pp. 222–255, 2012, doi: 10.1533/9780857096166.2.222.
 - [32] M. S. Zami and A. Lee, "Stabilised or unstabilised earth construction for contemporary urban housing?," *IET Conf. Publ.*, vol. 2010, no. 565 CP, pp. 227–240, 2010, doi: 10.1049/cp.2010.0440.
 - [33] R. Bahar, M. Benazzoug, and S. Kenai, "Performance of compacted cement-stabilised soil," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 7, pp. 811–820, 2004, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003.
 - [34] A. Guettala, H. Houari, B. Mezghiche, and R. Chebili, "Durability of Lime Stabilized Earth Blocks," *Courr. du Savoir-N°02*, pp. 61–66, 2002.
 - [35] O. Izemmourena and A. Guettala, "Amélioration de la durabilité des briques de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra," *MATEC Web Conf.*, vol. 11, 2014, doi: 10.1051/mateconf/20141102001.
 - [36] K. Dao, M. Ouedraogo, Y. Millogo, J. E. Aubert, and M. Gomina, "Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 84–96, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001.
 - [37] M. Olivier BOFFOUE *et al.*, "Influence de la teneur en ciment sur les propriétés thermomécaniques des blocs d'argile comprimée et stabilisée," *Afrique Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 35–43, 2015, [Online]. Available: <http://www.afriquescience.info>
 - [38] J. W. Bullard *et al.*, "Mechanisms of cement hydration," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1208–1223, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.09.011.
 - [39] W. Kurdowski, *Cement and concrete chemistry*, vol. 9789400779. 2014. doi: 10.1007/978-94-007-7945-7.
 - [40] "Effects of vermiculite on in-situ thermal behaviour , microstructure , physical and mechanical properties of fired clay bricks Central Analytical Research Facility (CARF), Queensland University of Technology (QUT), Centre for Clean Energy Technologies," pp. 0–36, 2022.
 - [41] D. Khoudja, B. Taallah, O. Izemmouren, S. Aggoun, O. Herihiri, and A. Guettala, "Mechanical and thermophysical properties of raw earth bricks incorporating date

- palm waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, p. 121824, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121824.
- [42] S. Layachi *et al.*, “Effect of incorporating Expanded polystyrene beads on Thermophysical, mechanical properties and life cycle analysis of lightweight earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 375, no. February, p. 130948, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130948.
- [43] A. Zaidi, O. Izemmouren, B. Taallah, and A. Guettala, “Mechanical and durability properties of adobe blocks filled with date palm wastes,” *World J. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 532–545, 2022, doi: 10.1108/WJE-02-2021-0094.
- [44] J. R. Prusinski and S. Bhattacharja, “Effectiveness of portland cement and lime in stabilizing clay soils,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 1, no. 1652, pp. 215–227, 1999, doi: 10.3141/1652-28.
- [45] S. Diamond, J. L. White, and W. L. Dolch, “Transformation of Clay Minerals by Calcium Hydroxide Attack,” *Clays clay Miner. (National Conf. Clays Clay Miner.*, vol. 12, no. 31, pp. 359–379, 1963, doi: 10.1346/ccmn.1963.0120134.
- [46] B. R. Stanmore and P. Gilot, “Review-calcination and carbonation of limestone during thermal cycling for CO₂ sequestration,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 86, no. 16, pp. 1707–1743, 2005, doi: 10.1016/j.fuproc.2005.01.023.
- [47] C. Rodriguez-Navarro, T. Ilić, E. Ruiz-Agudo, and K. Elert, “Carbonation mechanisms and kinetics of lime-based binders: An overview,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 173, no. March, 2023, doi: 10.1016/j.cemconres.2023.107301.
- [48] A. Jesudass, V. Gayathri, R. Geethan, M. Gobirajan, and M. Venkatesh, “Earthen blocks with natural fibres - A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. February, pp. 6979–6986, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.434.
- [49] O. Benaimeche, N. T. Seghir, Ł. Sadowski, and M. Mellas, *The Utilization of Vegetable Fibers in Cementitious Materials*, vol. 1–5, no. 2013. Elsevier Ltd., 2020. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11596-6.
- [50] N. Jannat, A. Hussien, B. Abdullah, and A. Cotgrave, “Application of agro and non-agro waste materials for unfired earth blocks construction: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 254, p. 119346, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119346.
- [51] S. Siddiqua and P. N. M. Barreto, “Chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 169, pp. 364–371,

2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.209.

- [52] S. Raj S., A. K. Sharma, and K. B. Anand, “Performance appraisal of coal ash stabilized rammed earth,” *J. Build. Eng.*, vol. 18, no. March, pp. 51–57, 2018, doi: 10.1016/j.jobbe.2018.03.001.
- [53] K. Gu and B. Chen, “Loess stabilization using cement, waste phosphogypsum, fly ash and quicklime for self-compacting rammed earth construction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, p. 117195, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117195.
- [54] D. C. Sekhar and S. Nayak, “Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 531–536, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125.
- [55] R. Vinai, A. Lawane, J. R. Minane, and A. Amadou, “Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 1088–1096, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.096.
- [56] P. Donkor and E. Obonyo, “Earthen construction materials: Assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks using polypropylene fibers,” *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 813–819, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.017.
- [57] I. I. Akinwumi, A. H. Domo-Spiff, and A. Salami, “Marine plastic pollution and affordable housing challenge: Shredded waste plastic stabilized soil for producing compressed earth bricks,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 11, p. e00241, 2019, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00241.
- [58] H. Limami, I. Manssouri, K. Cherkaoui, and A. Khaldoun, “Study of the suitability of unfired clay bricks with polymeric HDPE & PET wastes additives as a construction material,” *J. Build. Eng.*, vol. 27, no. June 2019, p. 100956, 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2019.100956.
- [59] H. Porter, J. Blake, N. K. Dhami, and A. Mukherjee, “Rammed earth blocks with improved multifunctional performance,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 92, pp. 36–46, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.013.
- [60] R. Medjo Eko, E. D. Offa, T. Yatchoupou Ngatcha, and L. Seba Minsili, “Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 340–346, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.050.

- [61] L. Miqueleiz *et al.*, “Alumina filler waste as clay replacement material for unfired brick production,” *Eng. Geol.*, vol. 163, pp. 68–74, 2013, doi: 10.1016/j.enggeo.2013.05.006.
- [62] J. E. Oti, J. M. Kinuthia, and R. B. Robinson, “The development of unfired clay building material using Brick Dust Waste and Mercia mudstone clay,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 102, pp. 148–154, 2014, doi: 10.1016/j.clay.2014.09.031.
- [63] S. Espuelas, J. Omer, S. Marcelino, A. M. Echeverría, and A. Seco, “Magnesium oxide as alternative binder for unfired clay bricks manufacturing,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 146, no. May, pp. 23–26, 2017, doi: 10.1016/j.clay.2017.05.034.
- [64] P. Nshimiyimana, D. Miraucourt, A. Messan, and L. Courard, “Calcium Carbide Residue and Rice Husk Ash for improving the Compressive Strength of Compressed Earth Blocks,” *MRS Adv.*, vol. 3, no. 34–35, pp. 2009–2014, 2018, doi: 10.1557/adv.2018.147.
- [65] J. A. Bogas, M. Silva, and M. Glória Gomes, “Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates,” *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 13, no. 4, pp. 569–584, 2019, doi: 10.1080/15583058.2018.1442891.
- [66] C. Zhou, C. Li, L. Cui, G. Zhang, and X. Cui, “Investigation of unfired Bricks Prepared by Shangluo Molybdenum tailings,” no. Iccet, pp. 248–252, 2015, doi: 10.2991/iccet-15.2015.49.
- [67] H. B. Nagaraj and C. Shreyasvi, “Compressed Stabilized Earth Blocks Using Iron Mine Spoil Waste - An Explorative Study,” *Procedia Eng.*, vol. 180, pp. 1203–1212, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.281.
- [68] O. S. Oladeji and A. F. Akinrinde, “Performance Characteristics Of Stabilized Clay Bricks Using Additives,” *J. Engrg Res. Appl.* www.ijera.com, vol. 3, no. 6, pp. 806–810, 2013, [Online]. Available: www.ijera.com
- [69] R. M. Gandia, F. C. Gomes, A. A. R. Corrêa, M. C. Rodrigues, and R. F. Mendes, “Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 222, pp. 168–182, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.107.
- [70] N. Ali, K. Y. Yaacob, M. K. Burhanudin, S. Shahidan, and S. R. Abdullah, “Investigation of compressed earth brick containing ceramic waste,” *ARPN J. Eng.*

- [71] A. Pekrioglu Balkis, “The effects of waste marble dust and polypropylene fiber contents on mechanical properties of gypsum stabilized earthen,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 556–562, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.172.
- [72] H. Binici, O. Aksogan, and T. Shah, “Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, no. 4, pp. 313–318, 2005, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.07.013.
- [73] M. Xie, D. Gao, X. Liu, F. Li, and C. Huang, “Utilization of waterworks sludge in the production of fired/ unfired water permeable bricks,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 531, pp. 316–319, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.531.316.
- [74] N. Singh, O. A. Ogunseitan, and Y. Tang, “Medical waste: Current challenges and future opportunities for sustainable management,” *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 11, pp. 2000–2022, 2022, doi: 10.1080/10643389.2021.1885325.
- [75] S. Sangkham, “Face mask and medical waste disposal during the novel COVID-19 pandemic in Asia,” *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 2, no. August, p. 100052, 2020, doi: 10.1016/j.cscee.2020.100052.
- [76] H. Hossini, S. Atashkar, and T. Massahi, “Face Mask Consumption and Medical Waste Generation During the COVID-19 Pandemic in Iran: Challenges and Problems,” *Int. J. Heal. Life Sci.*, vol. 7, no. 3, 2021, doi: 10.5812/ijhls.115046.
- [77] S. S. Ray, H. K. Lee, D. T. T. Huyen, S. S. Chen, and Y. N. Kwon, “Microplastics waste in environment: A perspective on recycling issues from PPE kits and face masks during the COVID-19 pandemic,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 26, p. 102290, 2022, doi: 10.1016/j.eti.2022.102290.
- [78] Z. Bendjoudi, F. Taleb, F. Abdelmalek, and A. Addou, “Healthcare waste management in Algeria and Mostaganem department,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 4, pp. 1383–1387, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.10.008.
- [79] “Article L541-1 du Code de l ’ environnement Notre analyse,” 2023.
- [80] B. Djemaci, “La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d ’ efficacité Brahim Djemaci To cite this version : HAL Id : tel-00804063 La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d ’ efficacité,” 2013.

- [81] P. Lisa, "Introduction," *Fam. Mod. Ger.*, pp. 1–25, 2020, doi: 10.4324/9781003333142-1.
- [82] D. Université *et al.*, "Thèse de doctorat Thèse de doctorat," no. Paris VI, 2006.
- [83] A. Periathamby, "Municipal Waste Management," *Waste A Handb. Manag.*, pp. 109–125, 2011, doi: 10.1016/B978-0-12-381475-3.10008-7.
- [84] L. M. Johannessen, M. Dijkman, C. Bartone, D. Hanrahan, M. G. Boyer, and C. Chandra, *THE WORLD BANK Health Care Waste Management Guidance Note*, no. May. 2000.
- [85] Y. W. Cheng, F. C. Sung, Y. Yang, Y. H. Lo, Y. T. Chung, and K. C. Li, "Medical waste production at hospitals and associated factors," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 1, pp. 440–444, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.01.014.
- [86] Y. C. Jang, C. Lee, O. S. Yoon, and H. Kim, "Medical waste management in Korea," *J. Environ. Manage.*, vol. 80, no. 2, pp. 107–115, 2006, doi: 10.1016/j.jenvman.2005.08.018.
- [87] S. Jung, S. Lee, X. Dou, and E. E. Kwon, "Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 Resource Centre with ree information in English and Mandarin on The Novel Coronavirus COVID- 19 . The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect , The Company ' s Public News and Information," *Chem. Eng. J.*, no. January, 2020.
- [88] P. R. Armijo *et al.*, "Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID- 19 . The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect , the company ' s public news and information ," no. January, 2020.
- [89] L. Hossain *et al.*, "Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID- 19 . The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect , the company ' s public news and information ," no. January, 2020.
- [90] N. U. Benson, D. E. Bassey, and T. Palanisami, "COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint," *Heliyon*, vol. 7, no. 2, p. e06343, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06343.
- [91] T. S. Mahmud, K. T. W. Ng, N. Karimi, K. K. Adusei, and S. Pizzirani, "Evolution of COVID-19 municipal solid waste disposal behaviors using epidemiology-based

- periods defined by World Health Organization guidelines,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 87, no. June, p. 104219, 2022, doi: 10.1016/j.scs.2022.104219.
- [92] T. Chowdhury, H. Chowdhury, M. S. Rahman, N. Hossain, A. Ahmed, and S. M. Sait, “Estimation of the healthcare waste generation during COVID-19 pandemic in Bangladesh,” *Sci. Total Environ.*, vol. 811, p. 152295, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152295.
- [93] A. K. Das, M. N. Islam, M. M. Billah, and A. Sarker, “COVID-19 pandemic and healthcare solid waste management strategy – A mini-review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 778, p. 146220, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146220.
- [94] S. Ilyas, R. Ranjan, and H. Kim, “Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID- 19 . The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect , the company ’ s public news and information ,” no. January, 2020.
- [95] M. Askarian, P. Heidarpour, and O. Assadian, “A total quality management approach to healthcare waste management in Namazi Hospital, Iran,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 11, pp. 2321–2326, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.06.020.
- [96] K. Kalogiannidou, E. Nikolakopoulou, and D. Komilis, “Generation and composition of waste from medical histopathology laboratories,” *Waste Manag.*, vol. 79, pp. 435–442, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.08.012.
- [97] G. Giakoumakis, D. Politi, and D. Sidiras, “Medical waste treatment technologies for energy, fuels, and materials production: A review,” *Energies*, vol. 14, no. 23, 2021, doi: 10.3390/en14238065.
- [98] J. Cui *et al.*, “Disposal and resource utilization of waste masks: a review,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 8, pp. 19683–19704, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-25353-6.
- [99] H. Zhao *et al.*, “A review on emergency disposal and management of medical waste during the COVID-19 pandemic in China,” *Sci. Total Environ.*, vol. 810, p. 152302, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152302.
- [100] E. S. Windfeld and M. S. L. Brooks, “Medical waste management - A review,” *J. Environ. Manage.*, vol. 163, pp. 98–108, 2015, doi:

10.1016/j.jenvman.2015.08.013.

- [101] F. G. Torres and G. E. De-la-Torre, “Face mask waste generation and management during the COVID-19 pandemic: An overview and the Peruvian case,” *Sci. Total Environ.*, vol. 786, p. 147628, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147628.
- [102] S. W. Management, *COVID-19*.
- [103] O. E. Hart and R. U. Halden, “Computational analysis of SARS-CoV-2/COVID-19 surveillance by wastewater-based epidemiology locally and globally: Feasibility, economy, opportunities and challenges,” *Sci. Total Environ.*, vol. 730, p. 138875, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138875.
- [104] M. Zhao *et al.*, “Household Materials Selection for Homemade Cloth Face Coverings and Their Filtration Efficiency Enhancement with Triboelectric Charging,” *Nano Lett.*, vol. 20, no. 7, pp. 5544–5552, 2020, doi: 10.1021/acs.nanolett.0c02211.
- [105] K. Selvaranjan, S. Navaratnam, P. Rajeev, and N. Ravintherakumaran, “Environmental challenges induced by extensive use of face masks during COVID-19: A review and potential solutions,” *Environ. Challenges*, vol. 3, no. February, p. 100039, 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100039.
- [106] I. Wirawan, I. G. G. Wiryadi, I. K. A. Putra, and ..., “Characteristics of Paving Blocks with Addition of Mask Waste Fiber,” *Proc. 5th ...*, no. October, 2022, [Online]. Available: <https://e-journal.unmas.ac.id/index.php/icsd/article/view/5220%0Ahttps://e-journal.unmas.ac.id/index.php/icsd/article/download/5220/4091>
- [107] M. Ali *et al.*, “An Environmentally Friendly Solution for Waste Facial Masks Recycled in Construction Materials,” *Sustain.*, vol. 14, no. 14, 2022, doi: 10.3390/su14148739.
- [108] L. Ajam, A. Trabelsi, and Z. Kammoun, “Valorisation of face mask waste in mortar,” *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 7, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s41062-021-00729-0.
- [109] M. Castellote, E. Jiménez-Relinque, M. Grande, F. J. Rubiano, and Á. Castillo, “Face Mask Wastes as Cementitious Materials: A Possible Solution to a Big Concern,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 4, 2022, doi: 10.3390/ma15041371.
- [110] I. G. G. Wiryadi, I. P. A. P. Wirawan, I. M. W. Wijaya, I. K. A. Putra, and W. T.

- Sutrisno, “The Compressive Strength of Concrete with Addition of Single-Use Mask Waste Fiber,” *Int. Conf. Sustain. Dev.*, no. 5, pp. 131–139, 2021.
- [111] S. Avudaiappan *et al.*, “Innovative Use of Single-Use Face Mask Fibers for the Production of a Sustainable Cement Mortar,” *J. Compos. Sci.*, vol. 7, no. 6, 2023, doi: 10.3390/jcs7060214.
- [112] A. A. El Aal, M. A. Alsaiari, A. E. Radwan, and A. Fenais, “Smart waste management perspective of COVID-19 healthy personal protective materials in concrete for decorative landscape pavements and artificial rocks,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–20, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-30104-1.
- [113] P. Rajeev, A. Ramesh, S. Navaratnam, and J. Sanjayan, “Using Fibre recovered from face mask waste to improve printability in 3D concrete printing,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 139, no. April, p. 105047, 2023, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105047.
- [114] T. Thwe Win, P. Jongvivatsakul, T. Jirawattanasomkul, L. Prasittisopin, and S. Likitlersuang, “Use of polypropylene fibers extracted from recycled surgical face masks in cement mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 391, no. April, p. 131845, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131845.
- [115] W. Ahmed and C. W. Lim, “Effective recycling of disposable medical face masks for sustainable green concrete via a new fiber hybridization technique,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 344, no. April, p. 128245, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128245.
- [116] S. Oliveira, L. Soranço, T. Pereira, B. Games, C. Ferreira, and M. T. Barbosa, “Research of addition of N95 facial mask fibers, silica fume and marble powder in high performance mortar,” *Rev. Mater.*, vol. 28, no. 2, 2023, doi: 10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0042.
- [117] M. Koniorczyk, D. Bednarska, A. Masek, and S. Cichosz, “Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID- 19 . The COVID-19 resource centre is hosted on Elsevier Connect , the company ’ s public news and information ,” no. January, 2020.
- [118] J. Miah, J. Pei, H. Kim, R. Sharma, and J. Gook, “Since January 2020 Elsevier has created a COVID-19 resource centre with free information in English and Mandarin on the novel coronavirus COVID- 19 . The COVID-19 resource centre

is hosted on Elsevier Connect , the company ’ s public news and information ,” no. January, 2020.

- [119] G. Durmuş, D. Nur Çelik, R. Kılıç Demircan, and G. Kaplan, “Effect of waste COVID-19 face masks on self-compacting high-strength mortars exposed to elevated temperature,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 14, no. 8, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2022.102058.
- [120] D. Ningrum, A. Soehardjono, H. Suseno, and A. Wibowo, “Analysis of the Effect of Using Covid-19 Medical Mask Waste With Polypropylene on the Compressive Strength and Split Tensile Strength of High-Performance Concrete,” *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 1, no. 6(121), pp. 40–46, 2023, doi: 10.15587/1729-4061.2023.272529.
- [121] S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, R. Roychand, and G. Zhang, “Preliminary evaluation of the feasibility of using polypropylene fibres from COVID-19 single-use face masks to improve the mechanical properties of concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 296, p. 126460, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126460.
- [122] Z. ur Rehman and U. Khalid, “Reuse of COVID-19 face mask for the amelioration of mechanical properties of fat clay: A novel solution to an emerging waste problem,” *Sci. Total Environ.*, vol. 794, p. 148746, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148746.
- [123] K. Thoudam *et al.*, “Recycled Surgical Mask Waste as a Resource Material in Sustainable Geopolymer Bricks,” *Recycling*, vol. 8, no. 6, 2023, doi: 10.3390/recycling8060093.
- [124] K. Thoudam, N. Hossiney, S. Lakshmish Kumar, J. Alex, A. Bhalkikar, and A. Fathima, “Assessing performance of alkali-activated bricks incorporated with processed surgical masks,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 25, pp. 6432–6445, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.07.095.
- [125] Q. Nie, B. Wu, Z. Wang, X. Dai, and L. Chen, “Incorporation of Disposed Face Mask to Cement Mortar Material: An Insight into the Dynamic Mechanical Properties,” *Buildings*, vol. 14, no. 4, pp. 1–18, 2024, doi: 10.3390/buildings14041063.
- [126] S. Zulfiqar, H. Mujtaba, M. M. Shah, and K. Farooq, “Sustainable use of Fly Ash and used Face Masks for the Improvement of Engineering Characteristics of Expansive Clays,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 50, no. 3, pp. 1633–1647, 2025, doi:

- [127] ISO17892-4:2016; Geotechnical Investigation and Testing—Laboratory Testing of Soil—Part 4: Determination of Particle Size Distribution. AFNOR: La Plaine Saint, France, 2018; p. 41.
- [128] Y. Millogo *et al.*, “Earth blocks stabilized by cow-dung To cite this version : HAL Id : hal-01876848,” *Mater. Struct. Springer Verlag*, 2016, 49 (11), pp.4583, pp. 1–18, 2018.
- [129] Wang, S.; Gainey, L.; Mackinnon, I.D.; Xi, Y. High-and low-defect kaolinite for brick making: Comparisons of technological properties, phase evolution and microstructure. *Constr. Build. Mater.* 2023, 366, 130250.
- [130] S. N. Abbas, M. I. Qureshi, M. K. Alkharisi, M. Alturki, and Z. Ahmad, “Combined effect of silica fume and various fibers on fresh and hardened properties of concrete incorporating HDPE aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 445, no. July, p. 137940, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137940.
- [131] M. Ouedraogo *et al.*, “Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw,” *J. Build. Eng.*, vol. 23, pp. 250–258, 2019, doi: 10.1016/j.jobbe.2019.02.005.
- [132] Millogo, Y.; Hajjaji, M.; Ouedraogo, R. Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. *Constr. Build. Mater.* 2008, 22, 2386–2392.
- [133] L. S. Ho, K. Nakarai, M. Duc, A. Le Kouby, A. Maachi, and T. Sasaki, “Analysis of strength development in cement-treated soils under different curing conditions through microstructural and chemical investigations,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 634–646, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.112.
- [134] EN12390-3:2019; Testing Hardened Concrete—Part 3: Compressive Strength of Test Specimens. iTeh Standards: San Francisco, CA, USA, 2019.
- [135] S. Suparp, A. Ejaz, K. Khan, Q. Hussain, P. Joyklad, and P. Saingam, “Load-Bearing Performance of Non-Prismatic RC Beams Wrapped with Carbon FRP Composites,” *Sensors*, vol. 23, no. 12, 2023, doi: 10.3390/s23125409.
- [136] ASTM D2166-06; Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2013.
- [137] NFEN196-1; Méthodes d’essais des Ciments-Partie 1: Détermination des Résistances Mécaniques. AFNOR: La Plaine Saint, France, 2006.

- [138] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, and A. Kriker, “Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 59, pp. 161–168, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058.
- [139] XPP13-901; Briques et Blocs de terre crue pour murs et cloisons—Définitions—Spécifications—Méthodes d’essai—Conditions de réception. AFNOR: La Plaine Saint, France, 2022; p. 35.
- [140] M. Rosone, B. Megna, and C. Celauro, “Analysis of the chemical and microstructural modifications effects on the hydro-mechanical behaviour of a lime-treated clay,” *Int. J. Geotech. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 447–460, 2021, doi: 10.1080/19386362.2019.1639351.
- [141] S. Boonjaeng, P. Chindaprasirt, and K. Pimraksa, “Lime-calcined clay materials with alkaline activation: Phase development and reaction transition zone,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 95, pp. 357–364, 2014, doi: 10.1016/j.clay.2014.05.002.
- [142] Pkla, A.; Mesbah, A.; Rigassi, V.; Morel, J. Comparaison de méthodes d’essais de mesures des caractéristiques mécaniques des mortiers de terre. *Mater. Struct.* 2003, 36, 108–117.
- [143] M. Usman, M. Yaqub, M. Auzair, W. Khaliq, M. Noman, and A. Afaq, “Restorability of strength and stiffness of fire damaged concrete using various composite confinement techniques,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, p. 121984, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121984.
- [144] Z. Koadri, A. Benyahia, N. Deghfel, K. Belmokre, B. Nouibat, and A. Redjem, “Étude de l’effet du temps de traitement alcalin de fibres palmier sur le comportement mécanique des matériaux à base d’argile rouge de la région de M’sila,” *Matériaux Tech.*, vol. 107, no. 4, p. 404, 2019, doi: 10.1051/mattech/2019031.
- [145] Z. Laouidji *et al.*, “Exploring the Effect of Lime and Cement Ratios on the Mechanical Properties of Clay Bricks Made from Different Types of Soils,” *Buildings*, vol. 15, no. 4, 2025, doi: 10.3390/buildings15040631.
- [146] “Thermal behaviours of clay mixtures during brick firing : A combined study of in-situ XRD , TGA and thermal dilatometry Centre for Clean Energy Technologies and Practices & School of Earth and Atmospheric Sciences , Faculty of Science , Queensland Univers,” 2021.

- [147] S. Modgil, R. Singh, and C. Hannibal, “LJMU Research Online LJMU Research Online,” *Bus. Adm.*, 2021.
- [148] B. Taallah and A. Guettala, “The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 104, pp. 52–62, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007.
- [149] E. Ouedraogo, O. Coulibaly, A. Ouedraogo, and A. Messan, “Caractérisation mécanique et thermophysique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment. Mechanical and Thermophysical Properties of Cement and/or Paper (Cellulose) Stabilized Compressed Clay Bricks,” *J. Mater. Eng. Struct.*, vol. 2, pp. 68–76, 2015.
- [150] A. M. Joshi, S. M. Basutkar, M. I. Ahmed, M. Keshava, R. Seshagiri Rao, and S. J. Kaup, “Performance of stabilized adobe blocks prepared using construction and demolition waste,” *J. Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 4, no. 1, 2019, doi: 10.1007/s41024-019-0052-x.
- [151] A. I. Al-Hadithi, A. T. Noaman, and W. K. Mosleh, “Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC),” *Compos. Struct.*, vol. 224, no. March, p. 111021, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111021.
- [152] M. Giroudon, A. Laborel-Préneron, J. E. Aubert, and C. Magniont, “Comparison of barley and lavender straws as bioaggregates in earth bricks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 202, pp. 254–265, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.126.
- [153] I. Demir, “Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks,” *Waste Manag.*, vol. 28, no. 3, pp. 622–627, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.03.019.
- [154] V. Afrouhsabet and T. Ozbakkaloglu, “Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 73–82, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.
- [155] J. Khedari, B. Suttisonk, N. Pratinthong, and J. Hirunlabh, “New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, no. 1, pp. 65–70, 2001, doi: 10.1016/S0958-9465(00)00072-X.
- [156] M. Boumhaout, L. Boukhattem, H. Hamdi, B. Benhamou, and F. Ait Nouh,

“Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 241–250, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.217.

ANNEXES



Zakarya Laouidji 1, Mourad Boutlikht 1 Abdellah Douadi 1, Kamel Hebbache 1, Elhoussine Atiki 2,
Cherif Beleb-chouche 1,3,*, Laura Moretti 4 and Slawomir Czarnecki 5,*

ملخص: تُعد النفايات الطبية من التحديات البيئية المتنامية على المستويين العالمي والوطني، إذ تواجه الجزائر صعوبات في معالجتها بسبب اعتماد طرق تقليدية مثل الحرق والمعالجة المسبقة، وهي مكلفة وتخلّف آثارًا بيئية سلبية في المقابل، يشهد قطاع البناء تحولات كبيرة نحو حلول أكثر استدامة من خلال اعتماد مواد محلية ومنخفضة الانبعاثات، بهدف تقليص الاعتماد على الإسمنت الذي يُعد من أكثر المواد المسببة لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون. ويبرز الطوب الطيني خيار بناء بديل وواعد، نظراً لتوفره محلياً، كلفته المنخفضة، قابليته للتثبيت بوسائل بسيطة، فضلاً عن خصائصه الحرارية الجيدة التي تسهم في رفع كفاءة الطاقة للمباني. تهدف هذه الدراسة إلى تبيين نفايات الكمامات الطبية من خلال دمجها في الطوب الطيني المثبت بالجير والإسمنت لتحسين خصائصه الميكانيكية والحرارية، وبالتالي إنتاج مادة بناء مستدامة ذات أداء محسن. تم تقسيم العمل التجريبي إلى مرحلتين رئيسيتين:

في المرحلة الأولى، تمت دراسة تأثير إضافة الجير والإسمنت بنسب 2% إلى 10% على ثلاث أنواع من التربة المحلية. أظهرت النتائج أن الجير بنسبة 8% حسن مقاومة الضغط بنسبة 101% للتربة B، بينما حقق الإسمنت بنسبة 10% أفضل أداء ميكانيكي عام مع خفض امتصاص الماء.

أما المرحلة الثانية، فقد تضمنت إدماج نفايات الكمامات بأبعاد (1×0.5 سم² و 2×1 سم²) ونسب مضافة من 0% إلى 40%. وأظهرت النتائج تحسن العزل الحراري بنسبة 53.39% عند 40% ويُعد 2×1 سم²، كما ارتفعت مقاومة الضغط والانحناء بنسبة 10.59% و 13.49% عند نسب منخفضة (5% و 10%) للأبعاد 1×0.5 سم². تؤكد هذه النتائج أن الجمع بين الطوب الطيني كمادة بديلة للإسمنت، وتقنيات التثبيت التقليدية (الجير والإسمنت)، وتبيين نفايات الكمامات الطبية يشكل خياراً تقنياً وبيئياً واعدًا لإنتاج مواد بناء مستدامة، ذات خصائص ميكانيكية وحرارية محسنة.

الكلمات المفتاحية: النفايات الطبية، مواد البناء، الخصائص الميكانيكية، الموثوقية، البيئة، إعادة التدوير.

Résumé : Les déchets médicaux représentent un défi environnemental croissant aux niveaux mondial et national. En Algérie, leur traitement demeure problématique en raison de la dépendance à des méthodes traditionnelles telles que l'incinération et la désinfection préalable, qui sont coûteuses et génèrent des impacts environnementaux négatifs.

En parallèle, le secteur de la construction connaît une évolution importante vers des solutions plus durables grâce à l'utilisation de matériaux locaux et à faibles émissions, dans le but de réduire la dépendance au ciment, l'un des principaux émetteurs de dioxyde de carbone. La brique en terre crue s'impose comme une alternative de construction prometteuse, en raison de sa disponibilité locale, de son faible coût, de sa facilité de stabilisation ainsi que de ses bonnes propriétés thermiques contribuant à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Cette étude a pour objectif de valoriser les déchets de masques médicaux en les incorporant dans des briques en terre crue stabilisées à la chaux et au ciment afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques et thermiques, et de développer ainsi un matériau de construction durable aux performances optimisées.

Le programme expérimental a été divisé en deux étapes principales : Dans la première étape, l'effet de l'ajout de chaux et de ciment à des taux variant de 2 % à 10 % a été étudié sur trois types de sols locaux. Les résultats ont montré qu'un ajout de 8 % de chaux a permis d'augmenter la résistance à la compression de 101 % pour le sol B, tandis qu'un ajout de 10 % de ciment a conduit à la meilleure performance mécanique globale, avec une réduction significative de l'absorption d'eau.

La deuxième étape a consisté à incorporer des déchets de masques médicaux de dimensions (0,5 × 1 cm² et 1 × 2 cm²) à des taux allant de 0 % à 40 %. Les résultats ont révélé une amélioration de l'isolation thermique de 53,39 % pour un taux de 40 % et une dimension de 1 × 2 cm². Par ailleurs, la résistance à la compression et à la flexion a augmenté respectivement de 10,59 % et 13,49 % pour de faibles taux d'incorporation (5 % et 10 %) avec les dimensions de 0,5 × 1 cm².

Ces résultats confirment que l'association de la brique en terre crue, des techniques de stabilisation traditionnelles et de la valorisation des déchets de masques médicaux constitue une option prometteuse pour produire des matériaux de construction durables, aux performances mécaniques et thermiques améliorées, tout en réduisant l'impact environnemental.

Mots clés : déchets hospitaliers, matériaux de construction, caractéristiques mécaniques, fiabilité, Environnement, recyclage.

ABSTRACT: Medical waste represents a growing environmental challenge at both the global and national levels. In Algeria, its management remains problematic due to reliance on traditional methods such as incineration and preliminary disinfection, which are costly and generate negative environmental impacts.

At the same time, the construction sector is undergoing a significant shift toward more sustainable solutions through the use of local, low-emission materials, aiming to reduce dependence on cement, one of the main sources of carbon dioxide emissions. Adobe bricks (raw earth bricks) emerge as a promising construction alternative due to their local availability, low cost, ease of stabilization, and good thermal properties that contribute to improving the energy efficiency of buildings. This study aims to valorize medical mask waste by incorporating it into lime- and cement-stabilized adobe bricks to enhance their mechanical and thermal properties, thereby developing a sustainable construction material with optimized performance.

The experimental program was divided into two main stages: In the first stage, the effect of adding lime and cement at rates ranging from 2% to 10% was studied on three types of local soils. The results showed that adding 8% lime increased the compressive strength by 101% for soil B, while adding 10% cement achieved the best overall mechanical performance, along with a significant reduction in water absorption.

The second stage involved incorporating medical mask waste with dimensions of 0.5 × 1 cm² and 1 × 2 cm² at rates ranging from 0% to 40%. The results revealed an improvement in thermal insulation of 53.39% at a 40% incorporation rate and 1 × 2 cm² size. Additionally, compressive and flexural strength increased by 10.59% and 13.49%, respectively, for low incorporation rates (5% and 10%) with the smaller 0.5 × 1 cm² size.

These results confirm that combining adobe bricks, traditional stabilization techniques, and the valorization of medical mask waste constitutes a promising option for producing sustainable construction materials with improved mechanical and thermal performance while reducing environmental impact.

Keywords: hospital waste, construction materials, mechanical properties, reliability, environment, recycling

